

**Die Darstellung der Arteria thoracica interna und ihrer Abgänge im
klinischen Kontext mit dem Methodenspektrum der
makroskopischen Anatomie und moderner Bildgebung**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. med. dent.

an der Medizinischen Fakultät

der Universität Leipzig

Eingereicht von: Florian Kaatz

Geburtsdatum / Geburtsort: 07.11.1987 / Weimar

Angefertigt am / in: Institut für Anatomie der Universität Leipzig
(Direktor: Prof. Dr. med. Ingo Bechmann)

Betreuer: PD Dr. med. Sabine Löffler, MME
Institut für Anatomie der Universität Leipzig

Dr. med. Nick Spindler
Leitender Oberarzt der Plastischen,
Ästhetischen und speziellen Handchirurgie
(Uniklinikum Leipzig)

Beschluss über die Verleihung des Doktorgrades vom: 19.03.2019

Bibliographische Beschreibung

Kaatz, Florian

Die Darstellung der Arteria thoracica interna und ihrer Abgänge im klinischen Kontext mit dem Methodenspektrum der makroskopischen Anatomie und moderner Bildgebung

Universität Leipzig, Dissertation

114 Seiten, 52 Literaturangaben, 62 Abbildungen, 19 Tabellen

Kurzreferat

Nach wie vor stellt die mediane Sternotomie einen wichtigen Zugangsweg zum Herzen in der kardiochirurgischen Bypass-Chirurgie dar. Nicht bei allen Patienten verläuft der postoperative Heilungsprozess ohne Zwischenfälle. Besonders ältere Patienten mit bestimmten Risikofaktoren, wie die Verwendung der A. thoracica interna (ITA) als Bypass, weisen ein erhöhtes Risiko für die Entstehung tiefer sternaler Wundheilungsstörungen (DSWI) auf. Chirurgische Folgeeingriffe mit begleitender intensivmedizinischer Therapie und verlängerten Liegezeiten sind die Folge. Dabei stellen genaue Informationen über die Gefäßversorgung des Sternums, z.B. auch die Ausbildung möglicher Kollateralkreisläufe nach Entnahme der ITA, ein wichtiges Bindeglied in der Prävention der DSWI dar. Die vorliegende Studie vergleicht dazu verschiedene Methoden zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge am Alkohol- und Thiel-fixierten Präparat. Das methodische Vorgehen gliederte sich dabei in die makroskopische Präparation, die segmentierungsbasierte Rekonstruktion mittels Mimics® und einen semi-quantitativen Vergleich.

Zur makroskopischen Präparation wurden zwei Alkohol-fixierten und zwei Thiel-fixierten Körperspenderinnen der vordere Bereich der Brustwand („Thorax-Schild“) entnommen und die ITA und deren Abgänge präpariert.

Da die Weichgewebe nach Thiel-Fixierung realitätsnahe Eigenschaften behalten, blieben Gefäße durchgängig und eigneten sich zur Injektion erstarrender und darstellender Injektionsmassen, wie der Arterienmasse nach Thiel (1992), der

Kontrastmittelinjektion oder der Microfil®-Technik.

Da die segmentierungsbasierte Rekonstruktion zunehmend Einzug in die klinische Diagnostik hält, wurden zur Diskussion, ob Kollateralkreisläufe des Sternums identifiziert und dargestellt werden können, CT-Datensätze segmentierungsbasiert zu einem 3D-Modell umgewandelt, ausgewertet und mit den makroskopisch gewonnen Ergebnissen verglichen. Am Thiel-fixierten Präparat konnten zwei CT-Untersuchungen, wie sie im klinisch Alltag durchgeführt werden, simuliert und segmentiert werden. Zwar erfordert der Umgang mit dem Programm Mimics® Zeit, Erfahrung und gute klinische und anatomische Kenntnisse des Diagnostikers, jedoch konnte gezeigt werden, dass die digital gewonnen Bilder mit denen der makroskopischen Präparation übereinstimmen und somit die klinische Anwendung dieser Untersuchungsmethode möglich ist. Aufgrund fehlender Beschreibungen in der aktuellen Literatur, liefert die vorliegende Arbeit eine genaue Beschreibung der Verwendung des Programms Mimics® anhand von zwei Thorax-CTs.

Die Arbeit legt erstmalig einen ausführlichen Vergleich präparatorischer Techniken vor und ermöglicht den Einblick in neue Methoden zur Darstellung makroskopischer Strukturen mittels moderner bildgebender Verfahren und anschließender 3D-Rekonstruktion am Computer.

Für meinen Vater

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen.....	viii
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Anatomie des Thorax	2
1.2.1 Anatomie des knöchernen Thorax	3
1.2.2 Anatomie des Sternums.....	3
1.2.2.1 Blutversorgung des Sternums	5
1.3 Die A. thoracica interna (ITA).....	6
1.4 Die mediane Sternotomie	8
1.5 Tiefe sternale Wundheilungsstörungen (DSWI).....	9
1.5.1 Definition DSWI.....	9
1.5.2 Risikofaktoren DSWI.....	11
1.5.3 Therapie.....	12
1.6 Methoden zur Darstellung der Gefäßversorgung des Sternums	14
1.6.1 Allgemeines	14
1.6.2 Fixierung und Konservierung	14
1.6.3 Präparations- und Injektionstechnik.....	15
1.6.4 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion mit Mimics®	15
2 Material und Methodik	17
2.1 Untersuchungsmaterial.....	17
2.2 Fixierungen.....	19
2.2.1 Alkohol-Fixierung	19
2.2.2 Thiel-Fixierung	21
2.3 Übersicht der Methodik	27
2.4 Makroskopische Präparation	28
2.4.1 Präparation des Thorax-Schildes.....	28
2.4.2 Präparation der ITA und ihrer Abgänge	31
2.5 Injektionstechniken am Thiel-fixierten Präparat	33
2.5.1 Anwendung des Microfil®-Gemisches	33
2.5.2 Arterienmasse nach Thiel für die makroskopische Präparation.....	37

2.6 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion mittels Mimics®	45
2.6.1 Kontrastmittel-CT	49
2.6.2 Arterienmasse nach Thiel für die Computertomographie	54
2.7 Semi-quantitative Beurteilung der Methoden	56
2.8 Systematische Literaturrecherche	58
2.9 Statistische Auswertung	61
2.10 Fotografische und bildliche Dokumentation der Präparate	61
3 Ergebnisse	62
3.1 Makroskopische Präparation der ITA und ihrer Abgänge	62
3.1.1 Länge der ITA	62
3.1.2 Abgänge der ITA	63
3.2 Semi-quantitative Beurteilung der makroskopischen Präparation	67
3.2.1 Alkohol-fixierte Präparate	67
3.2.2 Thiel-fixierte Präparate	69
3.2.2.1 Thorax-Schild ohne Injektionstechnik	69
3.2.2.2 Thorax-Schild mit Injektionstechnik - Microfil®-Masse	71
3.2.2.3 Thorax-Schild mit Injektionstechnik – Arterienmasse nach Thiel	75
3.3 Semi-quantitative Beurteilung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mit Mimics®	78
3.3.1 Kontrastmittel-CT	79
3.3.2 Arterienmasse nach Thiel	86
4 Diskussion	98
4.1 Länge der ITA	99
4.2 Methodenvergleich zur Darstellung der ITA	99
4.2.1 Alkohol- vs. Thiel-Fixierung (ohne Injektion)	101
4.2.2 Alkohol- vs. Thiel-Fixierung (Microfil®)	102
4.2.3 Arterienmasse nach Thiel vs. Microfil®	103
4.3 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion	105
4.3.1 Interpretation der Bilder und Methodenvergleich	106
4.4 Vergleich mit anderen Methoden zur Gefäßdarstellung	109
4.5 Schlussfolgerung	112

5	Zusammenfassung	113
6	Literaturverzeichnis	115
7	Abbildungsverzeichnis	120
8	Tabellenverzeichnis	123
9	Danksagung	124
10	Ehrenwörtliche Erklärung	125
11	Lebenslauf	126
12	Anhang	127

Abkürzungen

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
Abb.	Abbildung
ant.	anterior
bds.	beidseits
bspw.	beispielsweise
BMI	Body Mass Index
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CT	Computertomografie
°C	Grad Celsius
DSWI	deep sternal wound infection
dex.	dexter
GV	Gesamtvolumen
h	Stunde(n)
HU	Hounsfield Unit
ICD	Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme
ICR	Intercostalraum
ITA	Arteria thoracica interna
JPEG	Joint Photographic Experts Group
kg	Kilogramm
KM	Kontrastmittel
k.A.	Keine Angaben
l	Liter
m	Meter
M.	Musculus
max.	maximal
mind.	mindestens
min	Minute(n)
ml	Milliliter

mm	Millimeter
PC	Personal Computer
proc.	Processus
post.	posterior
s.	siehe
s.o.	siehe oben
sin.	sinister
SSI	Surgical Site Infections
Tab.	Tabelle
tlw.	teilweise
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
V.	Vena
vs.	Versus
3D	dreidimensional

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Zugang zum Herzen in der kardiochirurgischen Bypass-Chirurgie erfolgt weitestgehend über die mediane Sternotomie (Raman et al. 2005). Postoperative tiefe sternale Wundheilungsstörungen sind mit einer Inzidenz von 0,2 – 2,3 % und einer Mortalität von 6 – 30 % seltene, aber ernstzunehmende Komplikationen (Mauermann et al. 2008). Die verminderte Durchblutung von Knochen- und Weichgewebe nach Verwendung der Arteria thoracica interna (ITA) als Bypass begünstigt die Entwicklung von Knochennekrosen des Sternums, Abszessen und Wundheilungsstörungen, die bis in das Mediastinum hinein reichen (Toumpoulis et al. 2005).

Genaue Kenntnisse über die Gefäßversorgung des Sternum stellen ein wichtiges Bindeglied zur möglichen Prävention postoperativer sternaler Gewebedefekte dar. Besonders Kollateralkreisläufe, die eine Blutversorgung des Sternums nach Entnahme der ITA gewährleisten können, stehen dabei im Vordergrund.

Das Ziel dieser Studie war es verschiedene präparatorische und bildgebende Techniken zur Darstellung der Gefäßversorgung des Sternums am Humanpräparat anzuwenden und umfassend miteinander zu vergleichen. Neben der anatomischen Präparation und der Injektion darstellender und erstarrender Massen, wurden moderne bildgebende Verfahren mit anschließender 3D-Rekonstruktion für diese Untersuchungen angewendet. Folgende Forschungsfragen waren dabei Gegenstand dieser Studie:

- 1.) Welche Methodik eignet sich zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge am anatomischen Präparat?
- 2.) Ist die makroskopische Präparation der segmentierungsbasierten Rekonstruktion überlegen?
- 3.) Wie kann man die Ergebnisse semi-quantitativ erfassen und beurteilen?
- 4.) Lassen sich Kollateralkreisläufe nach Anwendung der einzelnen Methoden auffinden?

1.2 Anatomie des Thorax

Die Anatomie des Thorax (Brustkorb) ist komplex. Jedoch ist sie hinreichend in anatomischen Büchern und Atlanten beschrieben. Die folgenden Abschnitte sollen einen Überblick über diese anatomische Region geben.

Der Thorax steht über die Apertura thoracis superior mit dem Hals in Verbindung und wird kaudal durch das Zwerchfell vom Bauchraum getrennt. Er lässt sich in den knöchernen Thorax mit seinem Gelenk- und Muskelapparat und in die Brusthöhle unterteilen. Die Brusthöhle gliedert sich wiederum in zwei Pleurasäcke und das median gelegene Mediastinum (Abb. 1, Schiebler 2007).

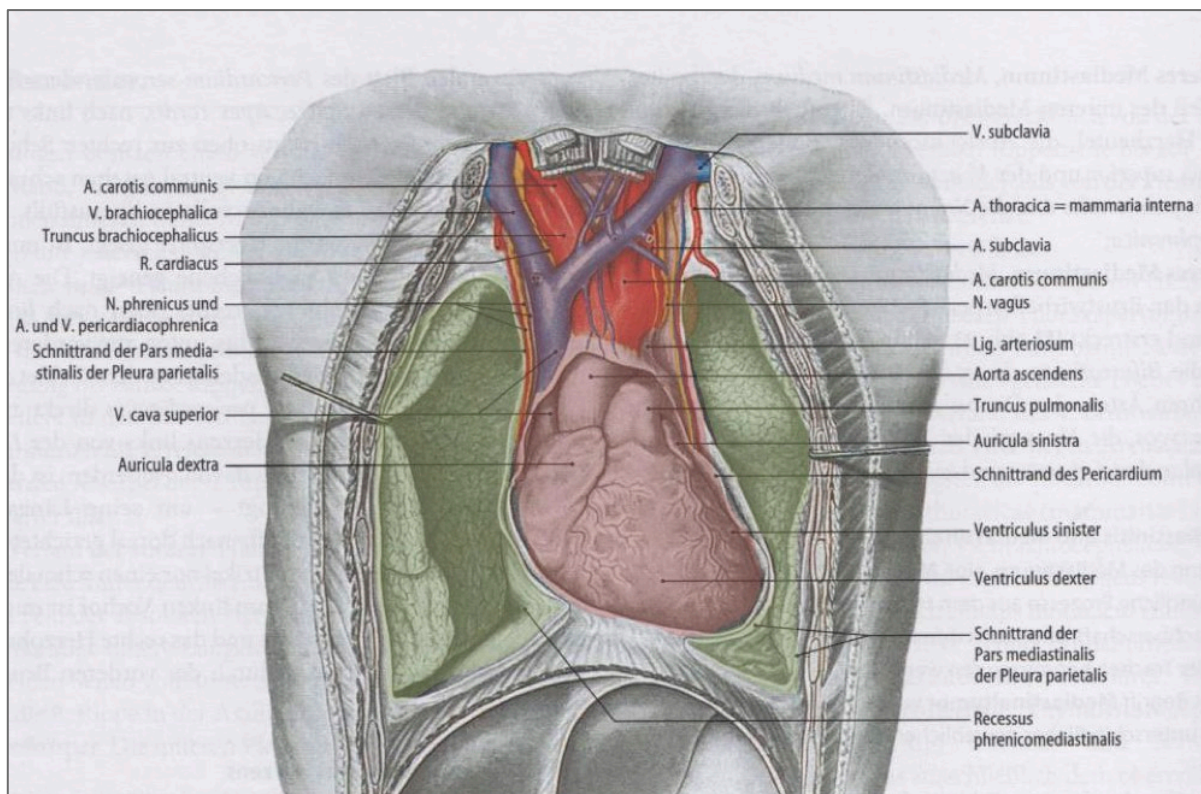


Abb. 1 | Übersicht der Brusthöhle. Die grün markierten Flächen stellen die beiden lateral gelegenen Pleurahöhlen dar und die rote Fläche das median gelegene Mediastinum (In Anlehnung an Tillmann 2010).

1.2.1 Anatomie des knöchernen Thorax

Der knöcherne Thorax besteht aus der Brustwirbelsäule, dem Sternum und den 12 Rippenpaaren, die alle über Gelenke miteinander verbunden sind und als stabiles Korsett fungieren. Gleichzeitig ist der Thorax beweglich, sodass er die Ein- und Ausatmung ermöglicht und auf unterschiedliche Druckverhältnisse reagieren kann. Diese Eigenschaften werden durch die Anordnung der Knochen, Gelenke, Bänder und Muskeln realisiert, die eine funktionelle Einheit bilden (Schiebler 2007). Nach kranial schließt der Thorax mit dem ersten Rippenpaar, dem Manubrium sterni und dem ersten Brustwirbelkörper ab (Apertura thoracis superior). Die Apertura thoracis inferior wird vom 12. Brustwirbel und 10., 11. und 12. Rippenpaar, sowie den knorpeligen Rippenbögen und dem Proc. xiphoideus des Sternums gebildet (Tillmann 2010).

Für den Schwerpunkt dieser Arbeit ist es wichtig speziell die Anatomie des Sternums zu beschreiben, wobei auf die Beschreibung der Brustwirbelsäule, der Rippen und des Gelenk- und Muskelapparates verzichtet wird.

1.2.2 Anatomie des Sternums

Das Sternum ist ein schwertförmiger platter Knochen und bildet einen Teil der ventralen Thoraxwand (Abb. 2). Es steht mit dem Schlüsselbein und den ersten sieben Rippenpaaren direkt in Verbindung. Das Sternum besteht aus drei Knochenteilen, wobei diese über knorpelhafte Verbindungen (Synchondrosen) miteinander verbunden sind (Wurzinger 2010):

1. Manubrium sterni
2. Corpus sterni
3. Proc. xiphoideus

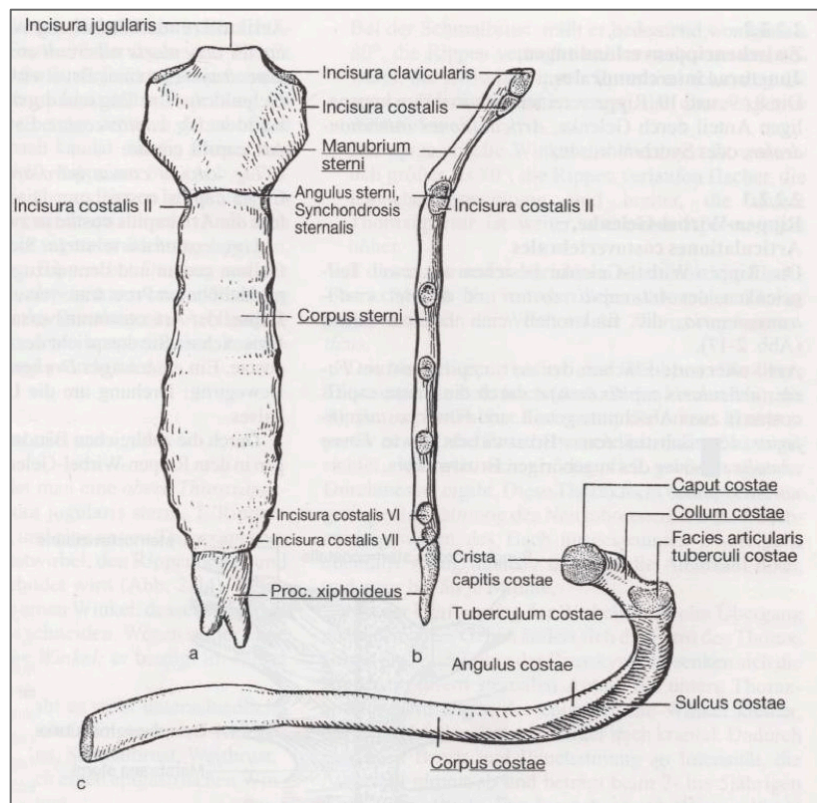


Abb. 2 | Übersicht des Sternums von vorn (a) und seitlich (b).
(Leutert 1995)

Das Manubrium sterni bildet den kranialen Teil des Sternums. Der obere Rand wird als Incisura jugularis bezeichnet und ist deutlich als eine Vertiefung erkennbar. Am Rand befinden sich Einkerbungen (Incisurae), die als Verbindungen zum Schlüsselbein und dem ersten Rippenpaar dienen. Der Übergang vom Manubrium zum Corpus, der nach dorsal abgewinkelt ist, lässt sich von außen als eine charakteristische Verdickung tasten (Angulus sterni). Dabei bildet der knorpelige Übergang (Synchrondrosis manubriosternalis) die Gelenkfläche für das zweite Rippenpaar. Das Corpus sterni ist der größte Teil des Sternums. Seitliche Vertiefungen (Incisurae costales) dienen der gelenkigen Verbindung zu den Rippenpaaren zwei bis sieben. Kaudal verjüngt sich das Corpus und stellt die knorpelige Verbindung zum Schwertfortsatz her. Der Proc. xiphoideus ist der kleinste Teil des Sternums und bildet sein kaudales Ende. Er ist kurz, dünn und kann zweigeteilt, gelocht, knorpelig oder verknöchert, nach vorne oder hinten gebogen sein (Schiebler 2007). Die knorpeligen Verbindungen zwischen den drei Knochenteilen können im Laufe des Lebens verknöchern. Die Spongiosa des Brustbeins enthält rotes blutbildendes Knochenmark (Leutert 1995).

1.2.2.1 Blutversorgung des Sternums

Die Blutversorgung des Sternums wird zu weiten Teilen durch die paarige ITA ermöglicht (s. 1.3). Laut DeJesus und Acland (1995) gibt es sechs verschiedene Gefäßtypen, die das Sternum entweder direkt oder indirekt - über die Ausbildung eines Kollateralkreislaufs - mit Blut versorgen können. Fünf Typen werden der ITA zugeordnet (Abb. 3) und einer der A. intercostalis post. (Abb. 4).

1. Sternal Abgang
2. Perforator, der das Weichgewebe nach anterior perforiert und mit Blut versorgt
3. A. intercostalis anterior
4. Perforator und sternaler Abgang mit gemeinsamen Stamm
5. A. intercostalis ant. und sternaler Abgang mit gemeinsamen Stamm
6. durchgehender Ast der A. intercostalis post.

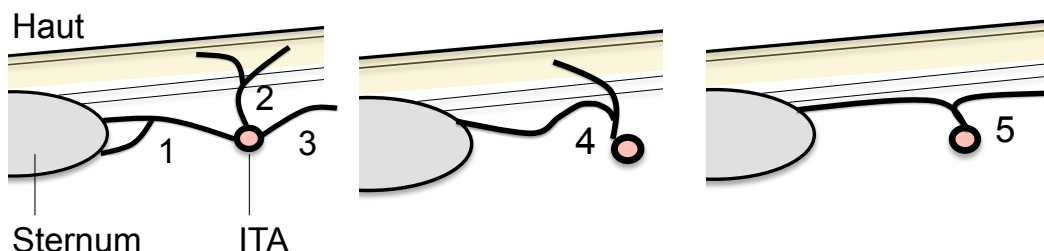


Abb. 3 | Abgänge der ITA unterteilt in fünf Typen (DeJesus und Acland 1995): 1 = sternaler Abgang, 2 = Perforator, 3 = A. intercostalis ant., 4 = sternaler und perforierender Abgang mit gemeinsamen Stamm, 5 = sternaler und intercostaler Abgang mit gemeinsamen Stamm (eigene Darstellung in Anlehnung an DeJesus und Acland 1995).

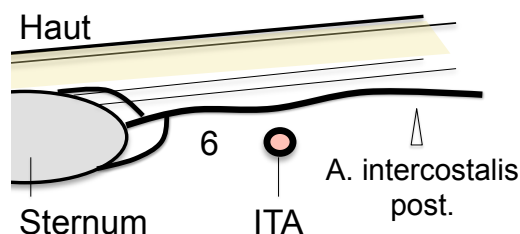


Abb. 4 | Die A. intercostalis post. als kollaterales Gefäß zur Versorgung des Sternums. (eigene Darstellung in Anlehnung an DeJesus und Acland 1995).

Drei der sechs beschriebenen Gefäßtypen können dabei das Sternum kollateral mit Blut versorgen:

a) Perforator und sternaler Abgang mit gemeinsamen Stamm (Abb. 3, Typ 4):

Diese kollaterale Blutversorgung des Sternums wird über die A. thoracoacromialis, die der A. axillaris entspringt und den M. pectoralis major versorgt, ermöglicht. Es bilden sich Anastomosen zwischen den Arterien des Muskels und den Perforatoren der ITA. Die Verbindung eines sternalen Abgangs mit einem Perforator über einen gemeinsamen Stamm ermöglicht so die Versorgung des Sternums mit Blut aus der A. axillaris.

b) A. intercostalis ant. und sternaler Abgang mit gemeinsamen Stamm (Abb. 3, Typ 5):

Dieser Typ ermöglicht eine kollaterale Blutversorgung des Sternums über die A. intercostalis post., die der Aorta thoracica entspringt.

c) A. intercostalis post. (Abb. 4, Typ 6):

Dieser Versorgungstyp zieht direkt zum Sternum ohne Anastomosen mit Abgängen der ITA auszubilden. Die Blutversorgung wird so direkt durch die Aorta thoracica ermöglicht.

1.3 Die A. thoracica interna (ITA)

Die ITA ist ein Ast der A. subclavia. In seltenen Fällen entspringt sie aus dem Truncus thyreocervicalis, der A. dorsalis scapulae, der A. thyroidea inferior oder dem Truncus costocervicalis (Ninković et al. 1998). Die ITA ist paarig angelegt und zieht ca. 1 cm parasternal an der Rückwand des Thorax nach kaudal. Auf ihrem Weg kreuzt sie zunächst die V. brachiocephalica unterhalb. Sie verläuft vor der Pleurakuppel und zieht dorsal des Sternoclaviculargelenks und der Rippenknorpel weiter nach kaudal (Paliouras et al. 2015). In Abbildung 5 ist ihr Verlauf am Thielfixierten Präparat gezeigt.

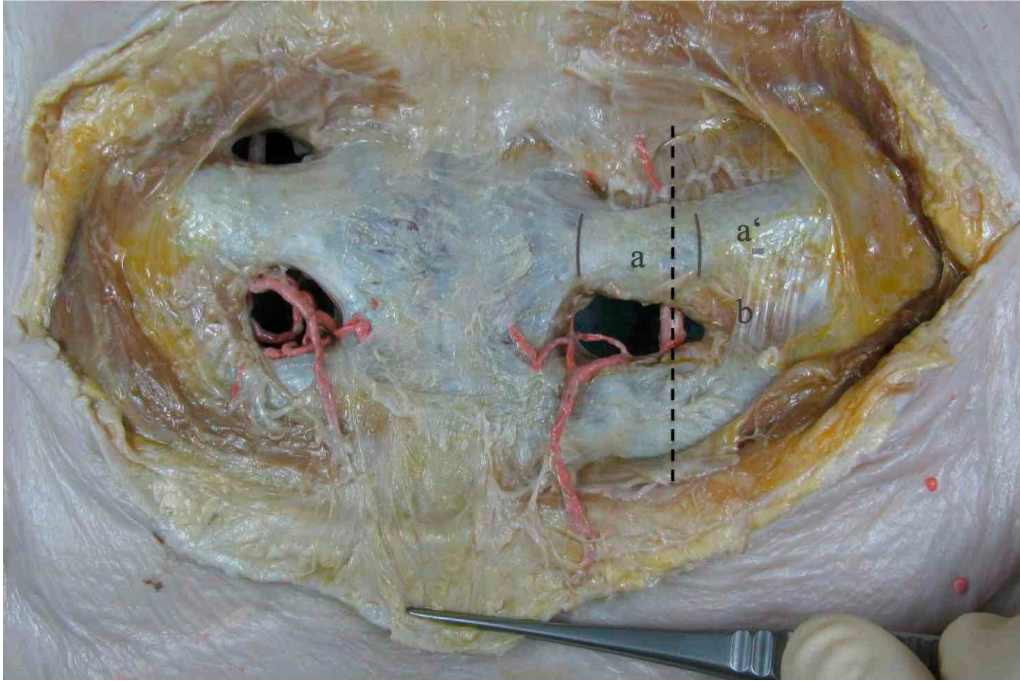


Abb. 5 | Thiel-fixiertes Humanpräparat nach Präparation der vorderen Brustwand und Darstellung der ITA. Blick von ventral. Der Verlauf der linken ITA ist auf Höhe des zweiten Intercostalraumes (b) gestrichelt dargestellt. a = Rippenknorpel; a' = zweite Rippe

Ab dem dritten Intercostalraum (ICR) läuft die ITA umgeben vom Musculus transversus thoracis und der Interkostalmuskulatur weiter nach abdominal und gibt auf Höhe jedes ICRs kleine Abgänge ab. Die Abgänge lassen sich in die folgenden vier Typen unterteilen (Paliouras et al. 2015):

1. sternaler Abgang
2. Perforator des anterioren Weichgewebes (Perforator)
3. A. intercostalis anterior
4. ein gemeinsamer Stamm, der sich kurz nach seinem Ursprung in die oben ausgeführten Typen aufteilen kann

Die ITA versorgt auf ihrem Weg entlang der vorderen Brustwand das Sternum, das anteriore Weichgewebe (tlw. die Mamma und den M. pectoralis major) und die Intercostalräume mit Blut. Auf Höhe des sechsten ICR und der siebten Rippe teilt sich die ITA in die A. musculophrenica und in die Arteria epigastrica superior auf. Auf ihrem Weg wird sie von der Vena thoracica interna begleitet.

1.4 Die mediane Sternotomie

Die Anfänge der medianen Sternotomie gehen auf Miltons Beschreibung von 1897 zurück (Dalton et al. 1992). In den darauffolgenden Jahren wurde diese chirurgische Herangehensweise aus Angst vor unerwarteten Komplikationen nur vereinzelt angewendet. Im Jahr 1957 wurde die Operationstechnik erneut aufgegriffen und für die breite Anwendung bei kardiochirurgischen Eingriffen empfohlen. Mit dem Aufkommen des Koronararterienbypasses wurde die mediane Sternotomie zu einer der am meisten angewandten chirurgischen Verfahren in der Herzchirurgie und gilt heute noch als Goldstandard (Dürreman und Massard 2006).

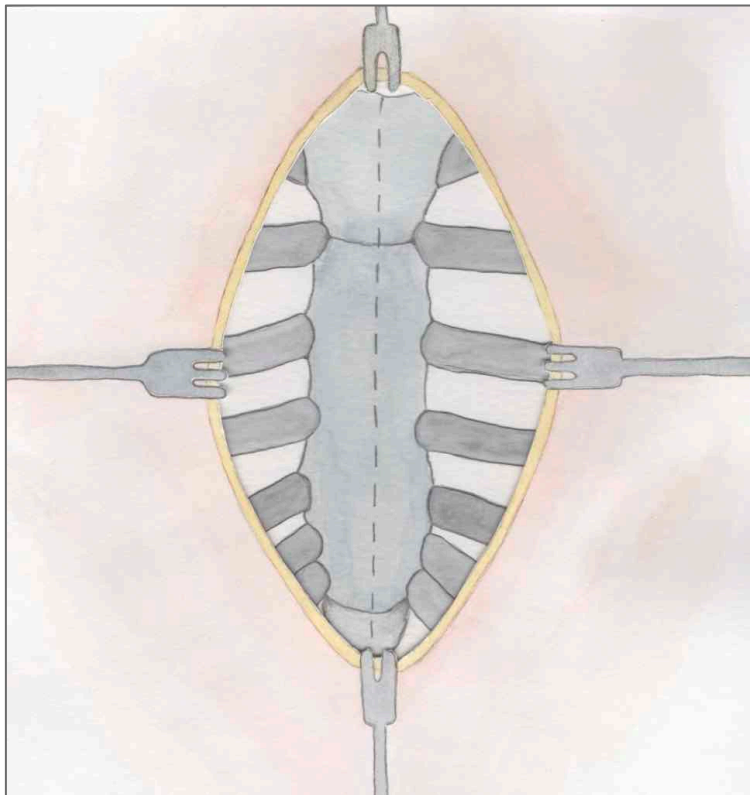


Abb. 6 | Die mediane Sternotomie als Standardzugang zur Brusthöhle in der Kardiochirurgie. Die gestrichelte Linie zeigt den längsverlaufenden Schnitt des Sternums.

Die mediane Sternotomie wird zur Eröffnung des Thorax verwendet. Dabei wird das Sternum mittels elektrischer oder luftgetriebener Säge in kraniokaudaler Richtung median zertrennt (Abb. 6). Anschließend lässt sich der Brustkorb mit einem Retraktor spreizen und der Brustsitus darstellen. Zum Verschluss des Sternums werden die Knochenränder möglichst präzise zueinander geführt und mit Drähten aus rostfreiem Stahl fixiert (Dürreman und Massard 2006).

1.5 Tiefe sternale Wundheilungsstörungen (DSWI)

Tiefe sternale Wundheilungsstörungen („deep sternal wound infection“- DSWI) stellen lebensbedrohliche Probleme für den Patienten nach medianer Sternotomie dar. Mit einer Inzidenz von 0,2 – 2,3 % und einer Mortalität von bis zu 30 % sind sie seltene, aber ernstzunehmende postoperative Komplikationen (Mauermann et al. 2008). Vor allem die Minderdurchblutung des Knochen- und Weichgewebes nach Entnahme der ITA in der kardiochirurgischen Bypasschirurgie begünstigen die Entstehung dieser Infektionen. Chirurgische Folgeeingriffe mit intensivmedizinischer Therapie, Antibiotika-Gabe und verlängerte Liegezeiten sind die Folge (Spindler et al. 2015).

1.5.1 Definition DSWI

Die DSWI ist eine Infektion, die infolge einer medianen Sternotomie entsteht. Sie lassen sich demzufolge den nosokomialen Infektionen zuordnen (Mangram et al. 1999). Infektionen, die infolge eines chirurgischen Eingriffs entstanden sind, lassen sich zudem übergreifend als „Surgical Site Infections“ (SSI) zusammenfassen (Horan et al. 1992). Je nach Tiefe und Ausbreitung der postoperativen Infektion lassen sich SSIs unterteilen in:

- I. Infektionen des inzidierten Gewebes:
 - a. Oberflächliche SSI (Haut und subkutanes Gewebe)
 - b. tiefe inzisionsbedingte SSI (z.B. Binde- und Muskelgewebe)
- II. SSIs, die Organe oder Körperhöhlen betreffen, die während der Operation nicht direkt inzidiert oder manipuliert wurden.

Es liegt bspw. eine *tiefe inzisionsbedingte SSI* vor, wenn die Infektion innerhalb von 30 Tagen nach Operation auftritt, sie die tief inzidierten Gewebeschichten (z.B. Binde- und Muskelgewebe) betrifft und somit die Infektion in Verbindung zur Operationstechnik, bzw. der operativen Herangehensweise steht. Mindestens eines der folgenden Kriterien sollte dabei begleitend vorkommen (Horan et al. 1992):

- Pusaustritt aus dem tief inzidiertem Gewebe
- Wunddehiszenz
- die chirurgische Wiedereröffnung des OP-Gebietes, wenn eines der folgenden Symptome zu finden ist:
 - >38°C Fieber
 - lokaler Wundschmerz
 - oder Druckdolenzen im Bereich der Inzision bei negativer Blutkultur des inzidierten Gewebes
- Abszedierung des tief inzidierten Gewebes
- visueller, histopathologischer oder radiologischer Nachweis einer Infektion durch den Chirurgen oder den behandelnden Arzt.

DSWIs umfassen in ihren ausgeprägten Formen Infektionen des Sternums (Osteomyelitis) und Mediastinums (Mauermann et al. 2008, Spindler et al. 2015). Da das Sternum während der medianen Sternotomie der Länge nach zertrennt wird (s. 1.4), lässt sich die Osteomyelitis des Sternums demzufolge den tiefen inzisionsbedingten SSIs zuordnen (Abb. 7 a). Die Mediastinitis wird nach Horan et al. (1992) den SSIs der Organe/Körperhöhlen zugeordnet (Abb. 7 b). Somit können eine tiefe inzisionsbedingte SSI des Sternums und eine SSI der Organe/Körperhöhlen, also die Mediastinitis, als DSWI betrachtet und zusammengefasst werden (Gattia et al. 2016).

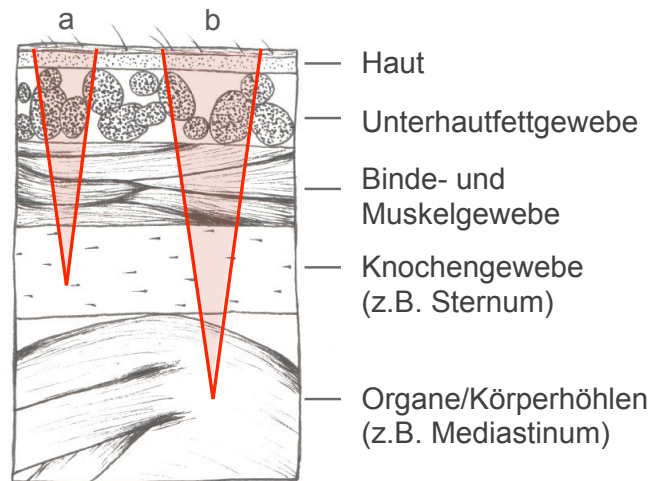


Abb. 7 | Schematische Darstellung einer tiefen inzisionsbedingten SSI und einer SSI der Organ/Körperhöhle. In (a) ist die Infektion auf die chirurgische Inzision beschränkt (Osteomyelitis des Sternums). In (b) tritt die Infektion in das Mediastinum über (SSI der Körperhöhle)

1.5.2 Risikofaktoren DSWI

In einer Leipziger Studie wurden an mehr als 9000 Patienten, die im Zeitraum von 1996 bis 1999 eine mediane Sternotomie erhielten, Risikofaktoren der DSWI bestimmt (Gummert et al. 2002). Dabei wurden Faktoren wie die Entnahme beider ITAs, die OP-Dauer, intraoperative maschinelle Unterstützung (z.B. intraaortale Ballonpumpe), verlängerte intensivmedizinische Therapie, verlängerte postoperative Beatmungszeiten, notwendige Re-Operationen, Diabetes mellitus, periphere arterielle Verschlusskrankheit und ein erhöhter Body-Mass-Index ($\text{BMI} \geq 30 \text{ kg/m}^2$) bestimmt. Faktoren wie eine chronisch obstruktive Lungenerkrankung oder eine Niereninsuffizienz haben dagegen nur ein geringes Risikopotential (Gummert et al. 2002).

1.5.3 Therapie

In der Studie von Spindler et al. aus dem Jahre 2015 wurden folgende Methoden zur Behandlung der DSWI beschrieben:

Zunächst besteht die Therapie der DSWI aus der chirurgischen Sanierung, bei der ein knöchernes Débridement durchgeführt und infiziertes Knochenmaterial abgetragen wird. Anschließend besteht die Möglichkeit die Wunde mit einem Vakuumverband steril zu verschließen und über eine Pumpe ein Negativdruck zu erzeugen. Dadurch können Wundsekrete kontinuierlich abgeführt und die Granulation des Gewebedefektes angeregt werden. Generell sollte der Defekt mit einer gefäßgestielten Lappenplastik zügig gedeckt werden. Man spricht von einer gestielten Lappenplastik, wenn der mobilisierte Lappen über einen Gefäßstiel mit seinem ursprünglichen Versorgungsgebiet verbunden bleibt. Folgende Arten werden von Spindler et al. (2015) zur Defektdeckung des Sternums genannt:

Musculus-pectoralis-Lappen

Dieser Lappen wird häufig zur Deckung sternaler Weichgewebsdefekte verwendet, wobei seine anatomische Muskellänge meist nur 2/3 des Sternums abdecken kann. Der Pectoralis-Lappen erhält seine Blutversorgung über Perforatoren der ITA.

Musculus-rectus-abdominis-Lappen

Der Musculus-rectus-abdominis-Lappen kann durch seine Größe zur Deckung tiefer und großflächiger Weichteildefekte verwendet werden. Gestielt wird er an die A. epigastrica sup. Er wird zur Deckung von Gewebedefekten der vorderen Brustwand und zur Rekonstruktion der weiblichen Brust verwendet. Jedoch kann bei Verwendung dieses Lappens eine Bauchwandschwäche mit möglicher Hernienbildung die Folge sein, wonach sich weitere Operationen anschließen können.

Omentum-majus-Transfer

Der Omentum-Lappen kann sowohl zur sternalen Weichteildeckung, als auch zur Versorgung tiefer mediastinaler Infektionen verwendet werden. Er wird über die A. gastroepiploica dext. und sin. ausreichend mit Blut versorgt und weist eine hohe antiinfektiöse Aktivität auf.

Musculus-latissimus-dorsi-Lappen

Dieser Lappen bietet durch seine große Fläche und seiner kontinuierlichen Blutversorgung beste Voraussetzung zur Deckung breitflächiger sternaler Gewebedefekte, wie sie vor allem nach Entnahme der ITA als Bypass auftreten können. Da der M. latissimus ein recht kräftiger Muskel ist, kann er gleichzeitig tiefe Defekte auffüllen und stabilisiert so die ventrale Brustwand (Abb. 8). Aufgrund dieser Vorteile wird der Musculus-latissimus-dorsi-Lappen als Standardmethode zur Deckung tiefer sternaler Gewebedefekte an der Universitätsklinik Leipzig verwendet.

Einfluss auf den Therapieerfolg haben dabei Faktoren, wie die Konstitution und Komorbidität des Patienten sowie bereits stattgefundenene Voroperationen und die Dauer und der Umfang der intensivmedizinischen Therapie (Spindler et al. 2015).

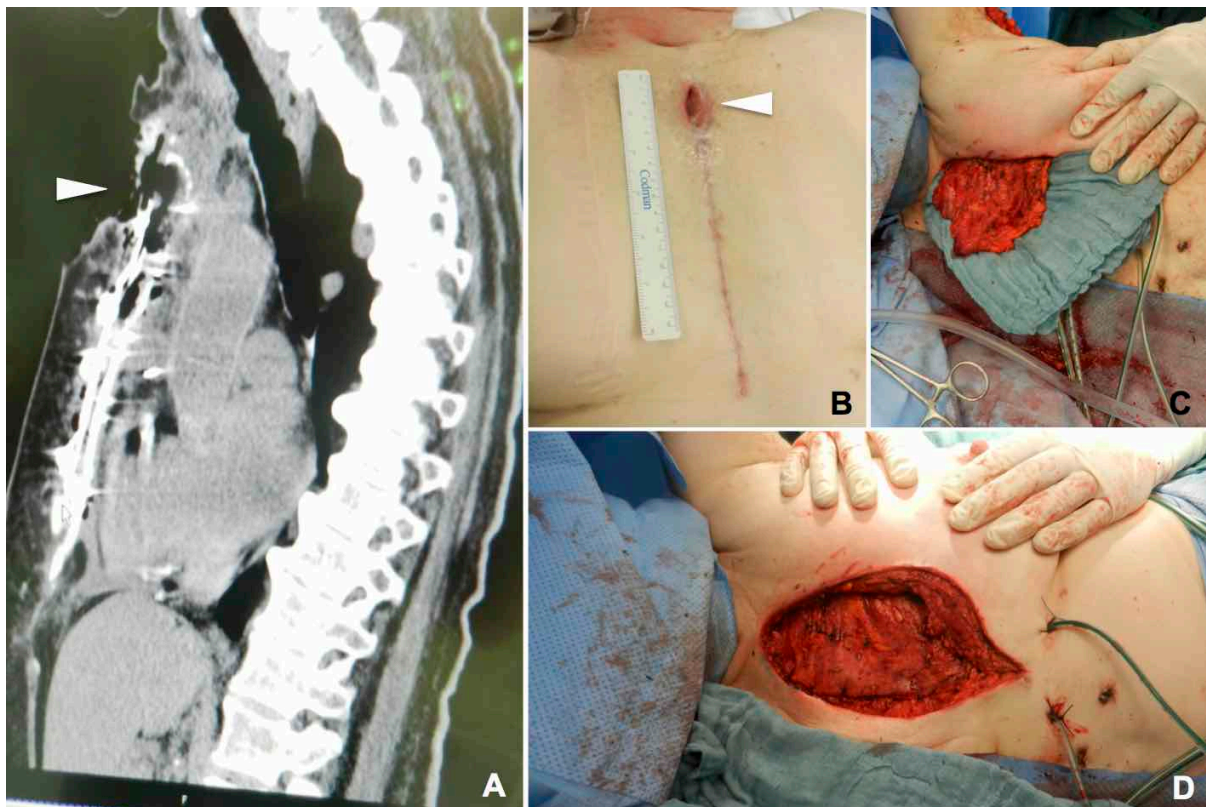


Abb. 8 | Klinischer Fall einer 77 jährigen Patientin nach medianer Sternotomie. Aufgrund einer tiefen sternalen Wundheilungsstörung (weiße Pfeile, Bild A radiologischer Befund, Bild B = klinischer Befund) wurde zur Defektdeckung ein gefäßgestielter Musculus-latissimus-dorsi-Lappen verwendet (C,D) (mit freundlicher Genehmigung von Herrn Dr. Nick Spindler, Ltd. Oberarzt der Plastischen, Ästhetischen und speziellen Handchirurgie Uniklinikum Leipzig)

1.6 Methoden zur Darstellung der Gefäßversorgung des Sternums

1.6.1 Allgemeines

Anatomische Strukturen lassen sich auf ganz unterschiedliche Art und Weise darstellen. Methoden der Präparation von Humanpräparaten umfassen Fixieren und Konservieren, Injizieren, Färben usw., wie sie täglich an anatomischen Instituten auf verschiedene Weise praktiziert werden (Steinmann 1982). Demgegenüber stehen Methoden der radiologischen und digitalen Bildgebung, wie bspw. dem CT, die essentieller Bestandteil der klinischen Diagnostik sind. Weiterführend lassen sich CT-Datensätze am PC segmentieren und dreidimensional rekonstruieren, wodurch gewünschte Strukturen komplett im Raum beurteilt werden können (Hirschfeld 2017).

1.6.2 Fixierung und Konservierung

Der Erhalt von Gewebe oder ganzer Leichen in einem möglichst lebensnahen Zustand wird als Fixierung bezeichnet. Hingegen spricht man von Konservierung, wenn das Präparat den Zustand nach der Fixierung über einen längeren Zeitraum beibehalten soll (Steinmann 1982).

Es gibt dabei verschiedene Methoden der Fixierung und Konservierung von humanen Präparaten. So können u.a. Alkohol oder Formalin als Fixierungs-, und Thymol oder Chinosol als Konservierungsmittel verwendet werden, wobei diese sich maßgebend auf die ursprüngliche Farbe und Konsistenz der Gewebe auswirken (Steinmann 1982). Eine weitere Methode zur Fixierung und Konservierung wurde 1992 von Walter Thiel beschrieben. Nach Anwendung der Thiel-Fixierung bleiben Gewebe weich, flexibel und farblich in einem realitätsnahen Zustand (Thiel 1992, Hammer et al. 2015).

Am Institut für Anatomie der Universität Leipzig werden zur Fixierung und Konservierung von Körperspendern die Alkohol-Fixierung und die Thiel-Fixierung verwendet.

1.6.3 Präparations- und Injektionstechnik

Zur Darstellung von Gefäßen an humanen Präparaten zählt die Injektionstechnik neben der makroskopischen Präparation zu den wichtigsten Methoden in der Präparationstechnik. Sie beinhaltet dabei u.a. die Injektion verschiedenfarbiger Massen zur makroskopischen Veranschaulichung, oder die Verwendung röntgenopaker Flüssigkeiten zur radiologischen Darstellung von Gefäßsystemen. Es lassen sich viele verschiedene Injektionsmassen zur Darstellung von Gefäßen finden, wobei sie grob in *darstellende Farblösungen* und in *erstarrende Injektionsmassen* unterteilt werden können (Steinmann 1982).

Als darstellende Lösungen können Röntgenkontrastmittel verwendet werden. Das wässrige Kontrastmittel härtet nicht aus und ist sehr fließfähig. Demgegenüber sind erstarrende Injektionsmassen meist dickflüssiger und techniksensibler. So bedarf es u.a. einen gleichmäßig hohen Injektionsdruck bei homogener Konsistenz und möglichst kleiner Partikelgröße der Masse (Steinmann 1982).

Die oben genannten Arten der Injektionstechnik werden in dieser Arbeit zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge angewendet und miteinander verglichen.

1.6.4 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion mit Mimics®

Mimics®, Materialises Interactive Medical Image Control System, ist ein spezielles Bildbearbeitungsprogramm der Firma Materialise HQ (Leuven, Belgien), mit dem es möglich ist 2D-Bild-Dateien in 3D-Modelle umzuwandeln (Materialise 2016). So können bspw. CT-Datensätze segmentiert, dreidimensional rekonstruiert und in dieser Form als Modell ausgedruckt werden. Sobald ein Datensatz in die Software eingelesen wurde, können Gewebe mittels verschiedener Werkzeuge automatisch, semi-automatisch oder manuell segmentiert werden. Die Unterscheidungen der Gewebe, wie bspw. Knochen- von Weichgewebe, basieren auf unterschiedlichen Grauwerten der einzelnen Bildpunkte (Pixel) im CT-Bild. Je dichter eine Struktur ist, desto heller (höherer Grauwert) erscheinen die Pixel. Die Grauwerte der Pixel identischer Gewebe sind dabei annähernd gleich (Hirschfeld 2017). Der Grauwert eines Pixels lässt sich mit dem Wert der Hounsfield-Unit (HU) quantitativ

beschreiben (Lamba et al. 2014). Die Hounsfield-Skala, die hauptsächlich 4069 Graustufen unterscheidet, ordnet dabei Geweben wie Knochen- oder Muskelgewebe bestimmte Grauwertbereiche zu. Unter Verwendung dieser Skala lassen sich mittels Mimics® Pixel innerhalb eines Grauwertbereiches (bspw. für Knochengewebe) bilderübergreifend zusammenfassen und farblich hervorheben. Basierend auf dieser Auswahl berechnet die Software ein Modell, das am Bildschirm des Computers in drei Dimensionen betrachtet werden kann.

Die Qualität einer segmentierungsbasierten Rekonstruktion mit Mimics® wird durch bestimmte Faktoren beeinflusst. So erhält die Software zur Berechnung eines 3D-Modelles durch eine hohe Auflösung der CT-Bilder (hohe Anzahl der Pixel) einen hohen Kontrast (hohe und niedrige HU-Wert) und mehr Informationen durch eine hohe Zahl an Schnittbildern bei möglichst geringem Abstand (Hirschfeld 2017, Hammer et al. 2017).

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Methoden zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge genauer beschrieben und hinsichtlich der eingangs gestellten Forschungsfragen miteinander verglichen und diskutiert.

2 Material und Methodik

Alle Abbildungen dieser Arbeit sind, wenn nicht anders beschrieben, vom Autor erstellt oder aufgenommen worden.

2.1 Untersuchungsmaterial

Jährlich werden bis zu 120 Körperspender am Institut für Anatomie Leipzig konserviert. Durch eine Letztwillige Verfügung erklären sich Menschen zu Lebzeiten bereit, ihren Körper für Lehre und Forschung zur Verfügung zu stellen (Wacker 2012).

Die Körperspender, die für diese Arbeit zur Verfügung standen, waren weiblich, mit einer Körpergröße von ca. 170 cm und einem Körpergewicht von ungefähr 70 kg (Body Mass Index [BMI] = $70\text{kg} \div (1,7\text{m})^2 = 24,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$), durchschnittlicher Konstitution und befanden sich im Alter von 77 bis 97 Jahren (Tab. 1).

Tab. 1 | Todesursachen laut Totenschein

Fixierung	Nr.	Alter in Jahren	Geschlecht	ICD-Schlüssel	Definition
Alkohol	1	97	♀	I46.9	Herzstillstand
				I50.9	Stauungslunge bei Herzinsuffizienz
				I10.9	Hypertonie mit hypertensiver Krise
					Cancer en cuirasse, bösartige Neubildung
	2	86	♀	I63.8	sonstiger Hirninfarkt einer Arteria
				I48.1	Paroxysmales Vorhofflimmern

Thiel	3	77	♀	J96.9	Respiratorische Insuffizienz
				C34.9	Bösartige Neubildung: Bronchus
				C79.3	Sekundäre bösartige Neubildung/Hautmetastasen
				I35.0	Aortenklappenstenose
	4	83	♀	J18.9	Septische Pleuropneumonie
				I50.9	Herzinsuffizienz
				I25.9	Chronische ischämische Herzkrankheit
	5	83	♀	I50.9	Herzinsuffizienz
				I25.9	Chronische ischämische Herzkrankheit

ICD, international Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems (WHO 1948)

Die Abkürzung ICD steht für die *Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme* der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Sie entwickelte sich auf dem vom Internationalen Statistischen Institut (ISI) 1893 beschriebenen und veröffentlichten Internationalen Todesursachenverzeichnis (WHO). Dieses Klassifikationssystem, welches seit 1990 unter der Abkürzung ICD 10 verwendet wird, ist derzeit das einzige international verwendete medizinische Instrument für Diagnosen, Symptome, Verletzungen und sonstige Gründe für die Inanspruchnahme des Gesundheitswesens (Graubner 2007). So werden seit 2004 alle stationären und ambulanten Patientenfälle nach der ICD-10-GM (German Modification) für Abrechnungszwecke verschlüsselt (Graubner 2007, Neumaier et al. 2012). Tabelle 1 beinhaltet neben den ICD-Schlüsseln (ICD-10 2001) auch Angaben über die Art der Fixierung, dem Alter und Geschlecht der Spender. Die Spendennummern eins bis fünf werden zur Beschreibung der Methoden im Text fortlaufend verwendet und beziehen sich auf die Angaben dieser Tabelle.

Alle nötigen Stammdaten der Körperspender wurden sorgfältig in einem Laborbuch

dokumentiert und die gewonnen Ergebnisse digital gespeichert. Die Körperspender wurden nach Beendigung der Versuche eingeäschert und in einer Urne beigesetzt.

2.2 Fixierungen

2.2.1 Alkohol-Fixierung

Traditionell wurden weltweit an Anatomischen Instituten Körperspender für den Präparierkurs mit Formalin fixiert (Benkhadra et al. 2011). Formaldehyd wirkt stark desinfizierend, inhibiert die Autolyse und trägt zu einer gewissen Festigkeit des Gewebes bei. Dabei ist die gesundheitsschädigende und kanzerogene Wirkung des Formaldehyds (IARC 2006) sowie die Verhärtung und der Verlust der natürlichen Farbe des Gewebes nach Fixierung zu beachten (Hammer et al. 2012, 2015). Als adäquater Ersatz wird seit den 1960er Jahren die Alkohol-Fixierung am Institut für Anatomie Leipzig angewendet. Hierbei beruht die Fixierung des Gewebes auf einem Ethanol-Glycerin-Gemisch und die Konservierung auf einem Ethanol-Thymol-Gemisch (Hammer et al. 2012). Die Konservierungslösung dient dazu, die Denaturierung der Eiweiße stabil zu halten.

Die zur Herstellung der Fixierungs- und Konservierungslösung benötigten Bestandteile sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Alle Mengenangaben beziehen sich auf einen Körperspender der durchschnittlichen Körpergröße von 170 cm und einem Körpergewicht von 70 kg (BMI = 24,2).

Tab. 2 | Hersteller- und Mengenangaben der für die Alkohol-fixierung verwendeten Materialien

Mittel	Menge	Hersteller
<i>Fixierungslösung</i>		
Ethanol	47,5 l	Brenntag GmbH
Glycerin	2,5 l	Chemie Vertrieb Magdeburg
<i>Konservierungslösung</i>		
Thymol	0,3 kg Thymol	Merck
Ethanol	1 l	Brenntag GmbH
Leitungswasser	10 l der Thymol-Enthanollösung auf 25 l verdünnt	

Der Anteil des Ethanols am Gesamtvolumen (GV) der Fixierungslösung beträgt 95%, der des Glycerins 5% (Tabelle 3). Dieses Verhältnis wird je nach BMI des Spenders angepasst, da Fettgewebe einen hohen Anteil der Lösung resorbiert und so ein höherer Anteil des Ethanols am GV benötigt wird (Hammer et al. 2012).

Tab. 3 | Mischverhältnis in Abhängigkeit vom BMI

BMI	Anteil in % am GV	
	Ethanol	Glycerin
24	95	5
> 30	97-98	2-3
< 20	90	10

BMI=Body Mass Index, GV= Gesamtvolumen

Im folgenden Abschnitt wird ein grober Ablauf der Alkohol-Fixierung beschrieben, wie sie am Institut für Anatomie durch erfahrene Sektionstechniker durchgeführt wird. Das genaue Vorgehen kann der Dissertation „Anatomische Voraussetzung für pedale Bypass-Revaskularisationen und den Stellenwert der Makroskopie“ von Anne Wacker (2012) entnommen werden.

Vor Applikation der Fixierungslösung werden die Spender registriert (Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht, Todesursache), gereinigt und rasiert. Mittels einer Pumpe (Ideal VA Funeralia, Würzburg, Deutschland) wird die Fixierung über zwei Kanülen in der A. femoralis, eine nach distal und die andere nach proximal zeigend, mit einem Druck von 0,5 bis max. 0,8 bar über 10 bis 15 Minuten gepumpt. Um ein gleichmäßiges Angebot der Konservierungslösung in allen Geweben zu gewährleisten, wird die Injektion für 2 Stunden unterbrochen. Dieser Zyklus wird innerhalb von 36 Stunden 6 bis 10 Mal wiederholt. Anschließend beginnt die Fixierung von *außen* in speziellen Fixierungsbecken (Funeralia GmbH, Würzburg, Deutschland). Dafür werden die Spender für etwa 4 - 6 Wochen in einer 65%igen Ethanol-Lösung gelagert, um dann von einem Baumwolltuch und einer Folie umhüllt bei +4°C für mindestens 3 Monate bis zu maximal 3 Jahren aufbewahrt zu werden.

2.2.2 Thiel-Fixierung

Walter Thiel entwickelte eine spezielle Fixierungs- und Konservierungslösung, die bezüglich des Erhalts von Farbe, Elastizität und Transparenz der Weichgewebe hervorragende Eigenschaften aufweist (Thiel 1992, 2002). Besonders durch die Haptik und Optik der Gewebe sowie die Flexibilität der Gelenke bilden Thiel-fixierte Körperspender eine optimale Grundlage für die Aus- und Weiterbildung chirurgischer Fähigkeiten an nicht lebenden Material (Jaung et al. 2011). So werden seit mehr als 15 Jahren Thiel-fixierte Körperspender erfolgreich für klinische Workshops am Institut verwendet (Abb. 9).



Abb. 9 | Klinischer Workshop zur Arthroskopie der Schulter an einem Thiel-fixierten Körperspender (mit freundlicher Genehmigung von Herrn Dirk Göthel, Firma Wolf).

Die Herstellung und Umsetzung der von Walter Thiel beschriebenen Original-Methode ist aufwendig und im Vergleich zur Alkohol-Fixierung deutlich kostenintensiver. Um Kosten und Zeit zu sparen, wurde am Institut für Anatomie Leipzig eine modifizierter Methode entwickelt (Hammer et al. 2015). Dabei basieren Leicheninfusions- und Tonnenlösung auf dem Originalrezept Thiels (1992). Die Zusammensetzungen der einzelnen Lösungen sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tab. 4 | Eigenschaften, Hersteller und Mengen der verwendeten Materialien der Thiel-Fixierung

Substanz	Menge	Hersteller	Eigenschaften
<i>Stammlösung</i>			
Heißes Leitungswasser	10 l	-	
Borsäure	0.3 Kg	Roth, Karlsruhe, Deutschland	desinfizierend konservierend
Ethylenglykol	3 l	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	weichhaltend
Ammoniumnitrat	2 Kg	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	farberhaltend

Kaliumnitrat	0,5 Kg	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	farberhaltend
<i>Chlorkresollösung</i>			
Destilliertes Wasser	0,25 l	Apotheke Klinikum	
Ethylenglykol	0,25 l	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	weichhaltend
p-Chlorokresol	0,03 Kg	Merck, Darmstadt, Deutschland	desinfizierend
<i>Injektionslösung/Tuchbefeuchtungslösung ($15 \frac{L}{Injektion}$)</i>			
Stammlösung (s.o.)	14,2 l	s.o.	
Chlorkresollösung (s.o.)	0,5 l	s.o.	
35% Formaldehyd	0,3 l	Roth, Karlsruhe, Deutschland	fixierend
Natriumsulfit	0,7 Kg	VWR BDH Prolabo, Darmstadt, Deutschland	farberhaltend
<i>Tonnenlösung ($228 \frac{L}{Küvette}$)</i>			
Heißes Leitungswasser	200 l	-	
p-Chlorokresol	0,19 Kg	Merck, Darmstadt, Deutschland	desinfizierend
35% Formaldehyd	4 l	Roth, Karlsruhe, Deutschland	Fixierung
Ethylenglycol	22 l	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	weichhaltend
Borsäure	6 Kg	Roth, Karlsruhe, Deutschland	desinfizierend konservierend

Ammoniumnitrat	20 Kg	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	farberhaltend
Natriumsulfit	20 Kg	VWR BDH Prolabo, Darmstadt, Deutschland	farberhaltend
Kaliumnitrat	10 Kg	ApplieChem, Darmstadt, Deutschland	farberhaltend

Alle Angaben beziehen sich auf Spender durchschnittlicher Konstitution (Körpergröße 170 cm, Körpergewicht 70 Kg, BMI= 24,2)

Durch die Zugabe von Salzen zur Lösung, wie Kalium- und Ammoniumnitrat, blässt das Gewebe nicht aus und bleibt intensiv und natürlich gefärbt. Zudem bleibt die Beweglichkeit der Gelenken und die Weichheit der Gewebe durch den Zusatz von Ethylenglykol erhalten (Hammer et al. 2015).

Zum Vergleich sind in Abbildung 10 ein Alkohol-fixiertes und ein Thiel-fixiertes Thorax-Schild gezeigt.

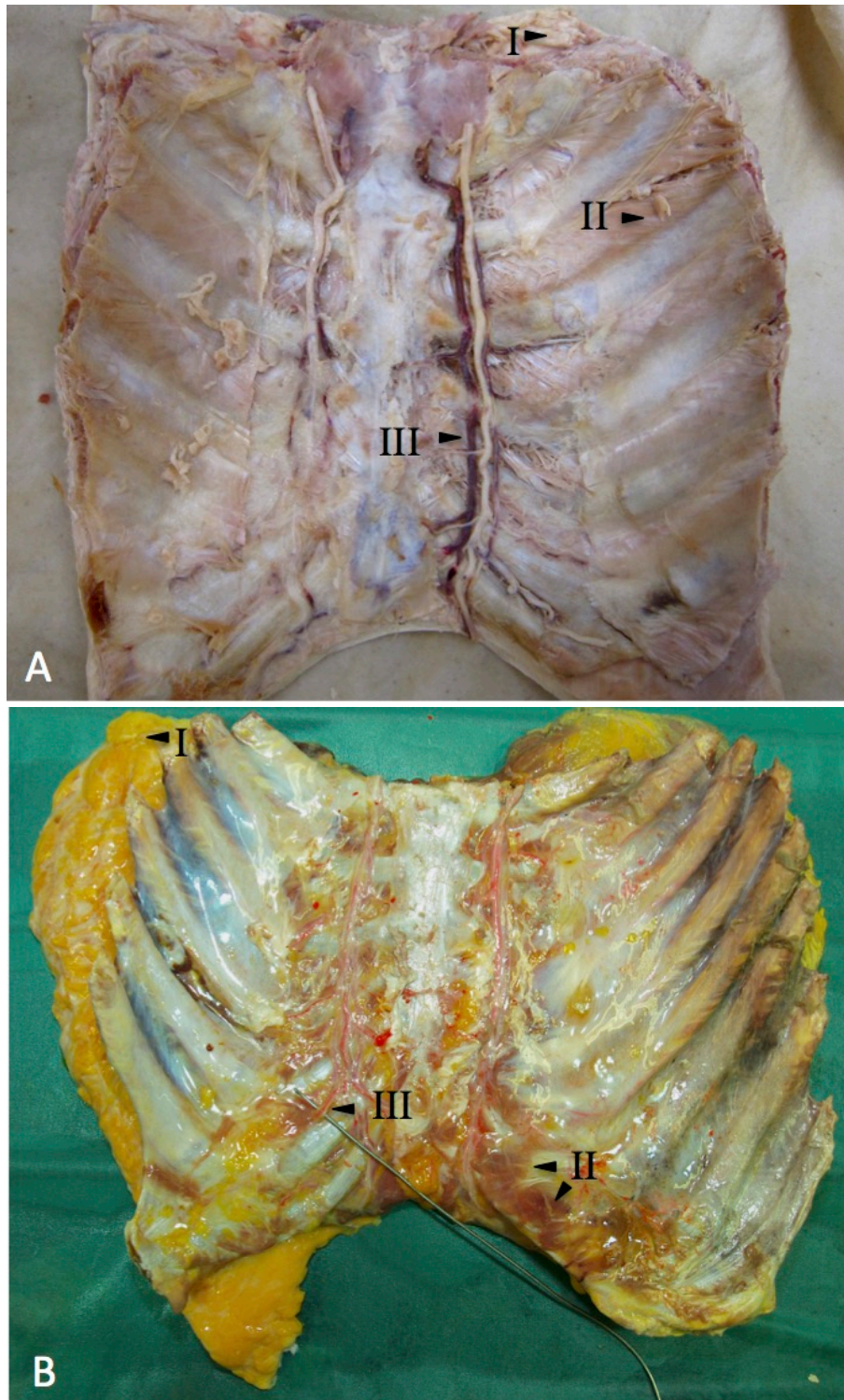


Abb. 10 | Vergleich zweier Thorax-Schilder nach (A) Alkohol-Fixierung und (B) Thiel-Fixierung. Im Vergleich erscheint das Fettgewebe (I) in (A) blass und kaum abgrenzbar, wohingegen es in (B) satt gelb bleibt. Muskelgewebe (II) ist in (A) blass, während es in (B) rot erscheint. Arterien und Venen (III) können nach Alkohol-Fixierung gut voneinander und vom umliegenden Gewebe getrennt werden (A), wobei Gefäße nach der Thiel-Fixierung weich und teilweise transparent bleiben und so schwer abgrenzbar sind

Anders als die von Thiel beschriebene Applikation der Injektionslösung über die A. iliaca externa, einen Trachealtubus, über das Rectum und intrathekal (Thiel 1992), erfolgt die Infusion der Fixierungslösung am anatomischen Institut Leipzig ausschließlich über die A. femoralis. Grundsätzlich ist die Applikationsart dieser Methode der Alkohol-fixierung angelehnt (s. 2.2.1). Die erfolgreiche Fixierung von *innen* ist erreicht, wenn sich das Keratin der Epidermis und die Nägel beginnen abzulösen. Die Fixierung und Konservierung der Leichen von *außen* geschieht in speziell angefertigten Edelstahlküvetten (Labecki, Leipzig, Deutschland). Bei Raumtemperatur liegen die Spender für mind. zwei Monate in 228 l der Tonnenlösung (Tab. 4) bevor sie erstmalig verwendet werden können. Die Präparate müssen auch nach diesen 2 Monaten stets feucht gehalten werden. Dazu werden sie während der Kurse feucht abgedeckt oder nach Beendigung zurück in die Küvetten gelegt (Hammer et al. 2015).

2.3 Übersicht der Methodik

Unter Abbildung 11 ist die Methodik der Arbeit grafisch visualisiert. Die Darstellung der ITA und ihrer Abgänge gliedert sich in die makroskopische Präparation und in die segmentierungsbasierte Rekonstruktion mittels Mimics®.

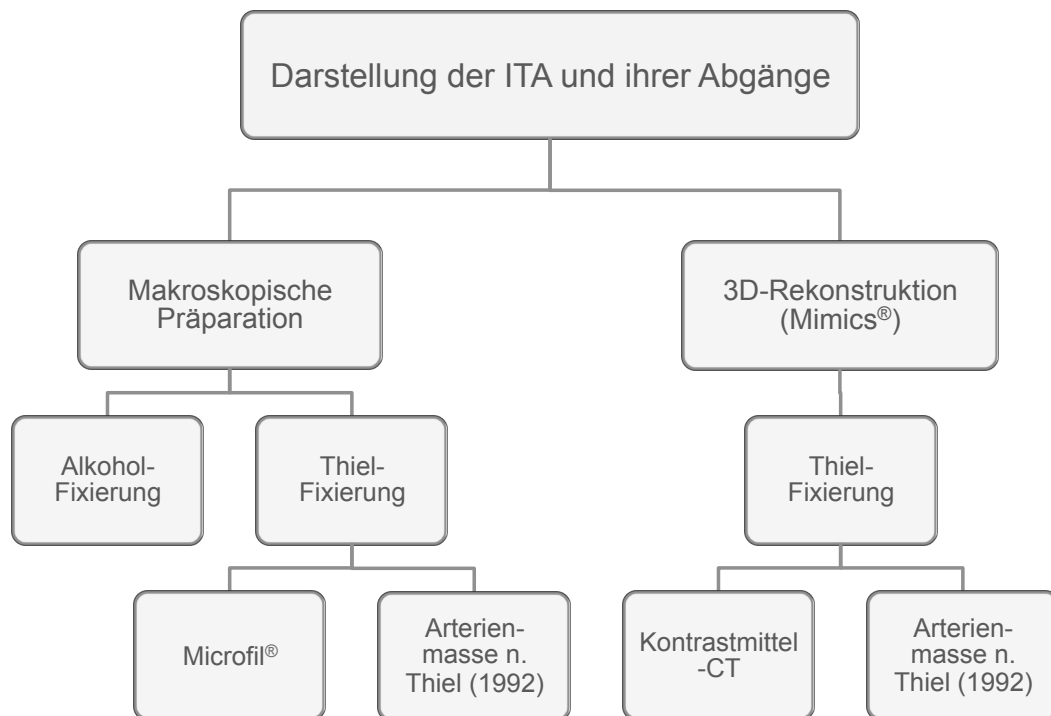


Abb. 11 | Methodik zur Darstellung von ITA und Abgängen.

Vier der fünf Körperspender wurden makroskopisch präpariert, und einer mittels Kontrastmittel-CT untersucht (Tab. 5). Aufgrund der Weichheit und Durchlässigkeit von Gefäßen nach Thiel-Fixierung (s. 2.2.2), wurden die drei Thiel-fixierten Präparate zur intraarteriellen Injektion verschiedener Injektionsmassen herangezogen. Aufgrund der Radioopazität des Kontrastmittels und der Arterienmasse Thiels (1992) konnten zwei CT-Datensätze angefertigt und anschließend mittels Mimics® segmentierungsbasiert rekonstruiert werden. Nach Anfertigung der Präparate und der 3D-Rekonstruktion wurden alle Methoden semi-quantitativ beurteilt und verglichen. In Tabelle 5 ist die jeweilige Untersuchungsmethode je Körperspender aufgeführt. Die Spender-Nummern wurden der Tabelle 1 entnommen.

Tab. 5 | Untersuchungsmethode je Körperspender

Fixierung	Spender-Nr.	Untersuchungsmethode
Alkohol	1	Makroskopische Präparation
	2	Makroskopische Präparation
Thiel	3	Microfil [®] -Technik Makroskopische Präparation
	4	Arterienmasse nach Thiel (1992) Makroskopische Präparation CT/Segmentierung mittels Mimics [®]
	5	Kontrastmittelinjektion CT/Segmentierung mittels Mimics [®]

In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die einzelnen Methoden eingegangen.

2.4 Makroskopische Präparation

Die Körperspender mit den Nummern eins bis vier wurden makroskopisch präpariert (Tab. 5). Spender-Nr. 5 wird in Abschnitt 2.6.1 separat behandelt. Zunächst wurden die Spender noch einmal mit Spendernummer, Alter, Geschlecht und Todesursache in einem Laborbuch aufgenommen.

2.4.1 Präparation des Thorax-Schildes

Ein Thorax-Schild bezeichnet den zur Präparation der ITA entnommenen Bereich der vorderen Brustwand. Nachfolgend wird die Präparationstechnik zur Entnahme eines Thorax-Schildes beschrieben und soll die Orientierung auf den Abbildungen erleichtern. Sie gilt sowohl für Alkohol- als auch für Thiel-fixierte Präparate. Alle

Präparate stammten aus Kursen des anatomischen Institutes Leipzig und wurden unter Berücksichtigung der Präparieranleitung (Institut für Anatomie der Universität Leipzig 2017) präpariert.

Mit einem Stift wurden die Begrenzungen des Schildes auf der Haut des Thorax aufgezeichnet (Abb. 12 A). Der erste Hautschnitt wurde mit einem Skalpell auf Höhe der Incisura jugularis gesetzt. Unterhaut und Unterhautfettgewebe wurden bis zum Ansatz des M. pectoralis major und des M. sternocleidomastoideus (vorderer Anteil) am Manubrium stumpf präpariert. Unter Erhalt des M. sternocleidomastoideus für den studentischen Präparierkurs, wurde dessen vorderer Ansatz mit einem Skalpell vorsichtig vom Manubrium gelöst. Der M. pectoralis major wurde anschließend durchtrennt (Abb. 12 B). Um nach der Entnahme des Schildes genügend Platz für die Präparation der ITA zu haben, wurde entlang der Linea medioclavicularis von der ersten bis zur siebten Rippe geschnitten. Nach stumpfer Präparation des Weichgewebes wurden die Rippen und das parietale Blatt der Pleura mit einer gebogenen Knochenschere durchtrennt (Abb. 12 C). Hinsichtlich der Präparieranleitung sollten die Clavicula und der M. sternocleidomastoideus als wichtige topografische Strukturen für den Studentenkurs erhalten bleiben. Demzufolge wurde das Manubrium unterhalb beider Sternoclaviculargelenke mit einer Knochensäge horizontal zertrennt und das Thorax-Schild vorsichtig von kranial angehoben (Abb. 12 D, E). Falls die ITA während der Präparation noch nicht vollständig von der A. subclavia getrennt wurde, kann hier noch einmal mit einer Schere oder einem Skalpell nachpräpariert werden, um das Abreißen vom Stammgefäß oder Verletzungen der ITA und ihrer Abgänge zu verhindern. Zuletzt wurde das Thorax-Schild unterhalb des Proc. xiphoideus und des siebten Rippenpaars vom übrigen Gewebe getrennt. Die Lagerung eines Thorax-Schildes erfolgte stets in einem feuchten Baumwolltuch, das mit der jeweiligen Konservierungslösung getränkt wurde (s. 2.2).

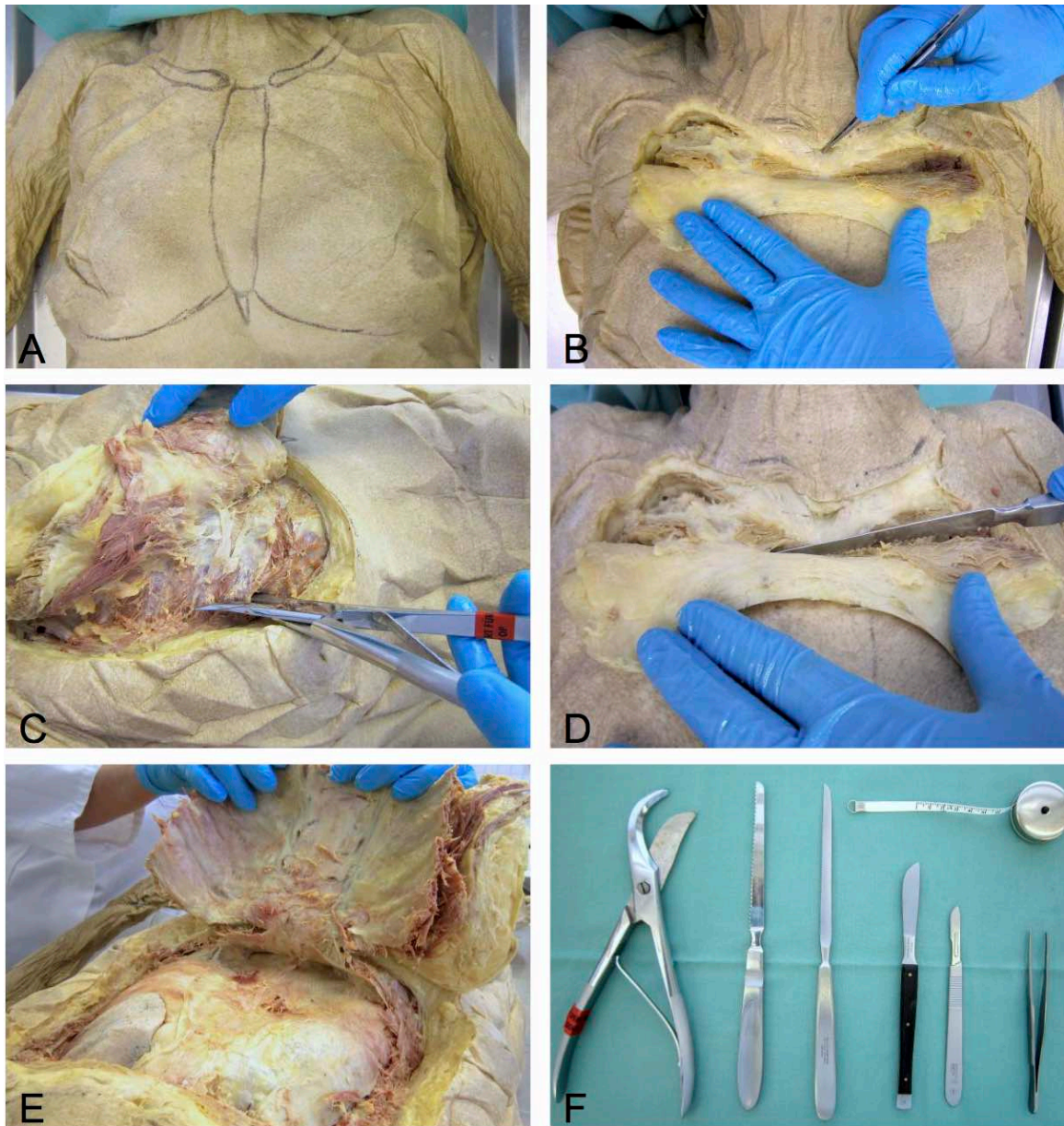


Abb. 12 | Entnahme des Thorax-Schildes einer 97 jährigen Alkohol-fixierten Spenderin. (A) Begrenzungen des Schildes, (B) Hautschnitt kranial, (C) Rippenschnitt mit Knochenschere, (D) Manubrium sterni mit Säge halbieren, (E) Anheben des Throaxschildes, (F) Instrumentarium

2.4.2 Präparation der ITA und ihrer Abgänge

Die makroskopische Präparation eines Thorax-Schildes stellte die Abgänge und den Verlauf der ITA dar. Die folgende Beschreibung der Präparationstechnik gilt für Alkohol-fixierte und für Thiel-fixierte Präparate.

Präparationstechnik

Mit einem Skalpell wurde seitlich der ITA die Pleura parietalis vorsichtig durchtrennt und abgezogen. Um die ITA während der Präparation nicht zu verletzen, wurde die darüber liegende Zwischenrippenmuskulatur mit einer Pinzette stumpf präpariert. Nun konnten die Arterie von Fett- und Bindegewebe befreit und die Abgänge präpariert werden (Abb. 14 A). Eine besondere Herausforderung bestand darin, die feinen Abgänge aufzufinden und freizupräparieren, ohne sie zu übersehen oder zu verletzen (Abb. 14 B). Die zur Präparation verwendeten Instrumente sind in Abbildung 13 aufgeführt.



Abb. 13 | Instrumentarium zur Präparation der ITA von links nach rechts: Skalpell (stumpf), anatomische Pinzette, Metallstäbchen mit stumpfer Spitze, Maßband (cm).

Nun wurde die Länge der ITA mit einem Maßband gemessen und notiert. Zur Dokumentation wurden der Verlauf und die Abgänge der jeweiligen ITA skizziert (Abb. 14 D).

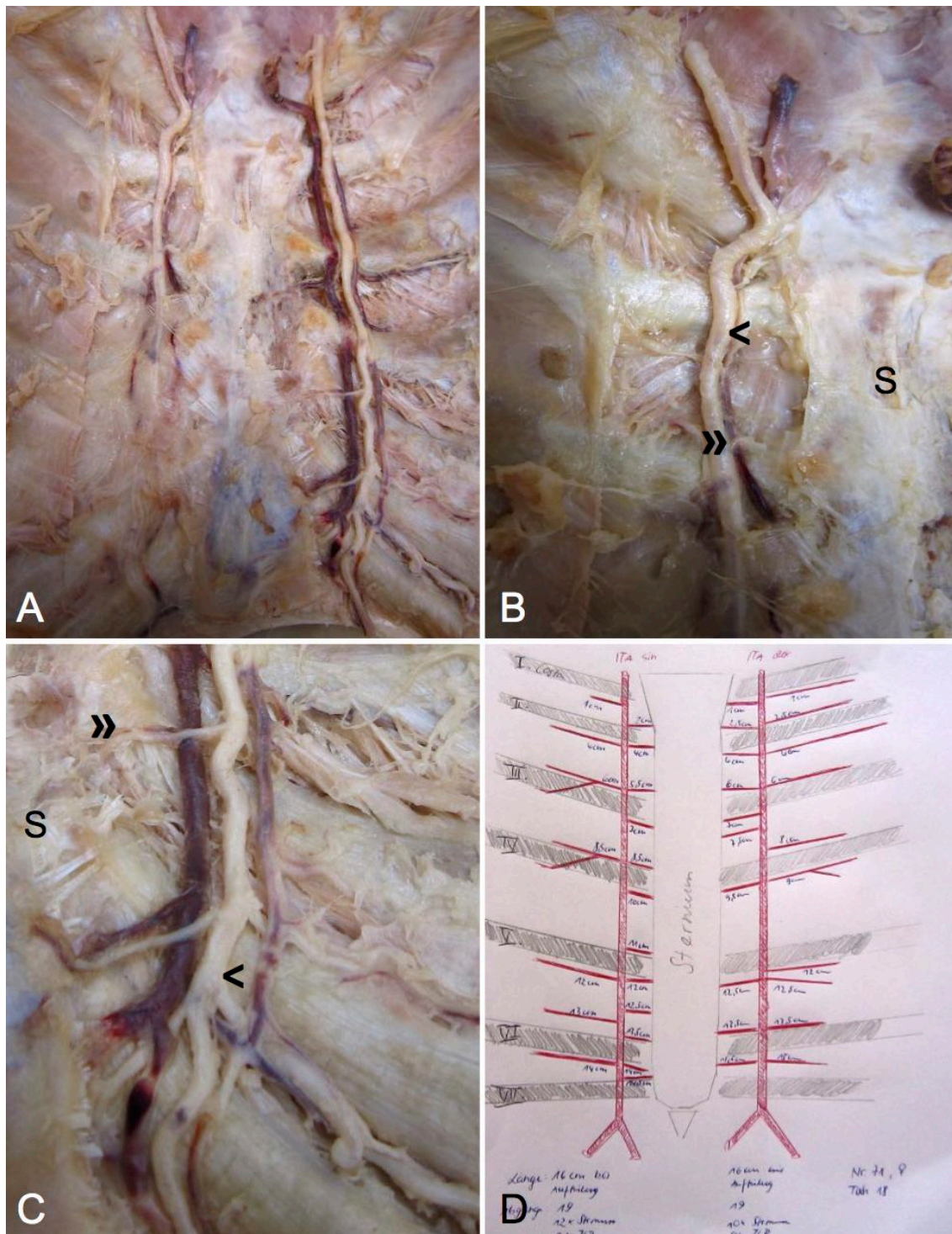


Abb. 14 | Präparation von ITA und Abgänge am Beispiel eines Alkohol-fixierten Thorax-Schildes. (A) Übersichtsaufnahme. Im Bild (B) und (C) sind Ausschnitte der ITA gezeigt. Man beachte die Größe der feinen Abgänge (<) in Relation zur ITA (>). (D) Dokumentationsbeispiel.

2.5 Injektionstechniken am Thiel-fixierten Präparat

Aufgrund der realitätsnahen Eigenschaften blieben die Gefäße der Thiel-fixierten Präparate weich, beweglich und durchgängig. Demnach eigneten sie sich für die intravaskuläre Injektion erstarrender Massen, die die Darstellung und Präparation der ITA und ihrer Abgänge verbesserten.

2.5.1 Anwendung des Microfil®-Gemisches

Das Microfil®-Gemisch ist ein fließfähiges und selbsthärtendes Silikon der Firma Flow Tech Inc. (Connecticut, USA). In Abbildung 15 sind die Komponenten des Injektionskits gezeigt.



Abb. 15 | Das Injektionskit (Microfil®), von links nach rechts: Verdünnungsmittel (MV-Diluent), MV-130 Red (Silikon, rot), MV-curing Agent (Härtemittel), klinische 10er Spritze und eine Kanüle zur Injektion

Präparation und Lagerung des Thorax-Schildes

Das hierzu verwendete Thorax-Schild wurde einer 77 jährigen Körperspenderin nach Thiel-Fixierung entnommen (Tab. 5 – Spender-Nr. 3). Da das Weichgewebe des Thorax-Schildes weich und mit der Tuchbefeuchtungslösung durchtränkt war, wurde das Schild während der Präparation auf einem Tuch in einer geeigneten Schale gelagert (Abb. 16).



Abb. 16 | Lagerung des Thiel-fixierten Thorax-Schildes auf einem grünen, mit der Tuchbefeuchtungslösung getränktem Tuch.

Um sich eine bessere Sicht während der Präparation zu verschaffen, wurde das Präparat mit einem Baumwolltuch vorsichtig trocken getupft. Nun wurden beide ITAs kaudal mit je einer Arterienklemme verschlossen, um ein Verlust der Masse während der Injektion zu verhindern. Kranial wurden zwei Kanülen (BD Microlance, 18G 1 1/2“) gelegt, die zur Injektion der Masse verwendet und über je eine Arterienklemme am Gefäß fixiert wurden (Abb. 17).

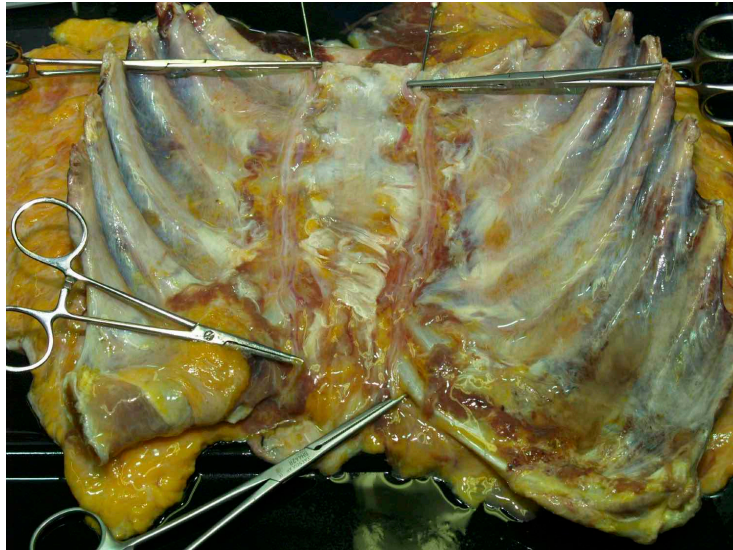


Abb. 17 | Vorbereitung des Thorax-Schildes für die Injektion der Microfil[®]-Masse.

Herstellung des Microfil[®]-Gemisches

Zur Herstellung des Microfil[®]-Gemischs wurde das MV-130 RED (Silikon, rot) mit dem MV-Diluent (Verdünnungsmittel) vermischt (Tab. 6). Nach Zugabe des MV-Curing Agent (Härtemittel) zur Masse, begann die Polymerisation und das Gemisch härtete aus. In Tabelle 6 sind die Bestandteile zur Herstellung einer Stammlösung von 100 ml aufgelistet.

Tab. 6 | Mischverhältnis zur Herstellung einer 100 ml Microfil[®]-Lösung

Substanzen	Produktbezeichnung	Menge in ml (Volumenanteil)
Silikon-Komponente	MV-130 RED	45
Verdünnungsmittel	MV-Diluent	55
<i>Mischen der Substanzen und Zugabe von</i>		
Härtemittel	MV-curing Agent	5 % (des GV) = 5

GV= Gesamtvolumen

Injektion und Aushärten der Masse

Mit dem Anmischen der Microfil®-Injektion beginnt eine feste zeitliche Abfolge, die das weitere Vorgehen am Präparat, als auch die chemischen Eigenschaften des Gemischs beeinflusst.

Sobald der Härter hinzugegeben wurde, begann die Verarbeitungszeit (Abb. 18).

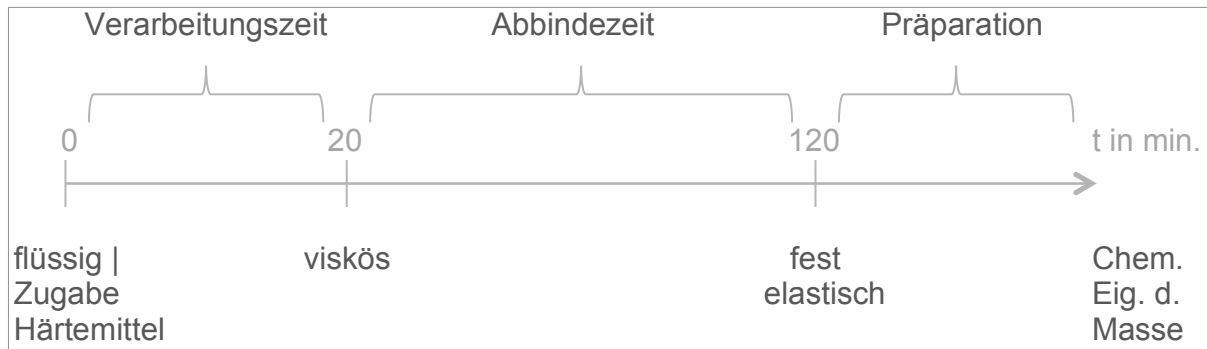


Abb. 18 | Zeitliche Abfolge der Microfil®- Injektion und die chemischen Eigenschaften der Masse

Innerhalb der Verarbeitungszeit von 20 min besaß die Masse die gewünschte Konsistenz und Fließfähigkeit zur Injektion. Dazu wurde die Masse in eine 10 ml Spritze (BD Discardit™ II) aufgezogen. Die Spritze wurde mit der liegenden Kanüle am Präparat verbunden und die Masse vorsichtig aus der Hand injiziert (Abb. 19 A, B). Nach der Injektion wurden die Kanülen entfernt und die liegenden Klemmen geschlossen (Abb. 19 C). Nach dem Aushärten der Masse nach 120 min konnte mit der Präparation der ITA und ihrer Abgängen begonnen werden (s. 2.4.2). Zu diesem Zeitpunkt besaß die Masse ihre elastische und formstabile Konsistenz.



Abb. 19 | Injektion des Microfil®-Gemisches. Bild (A) zeigt das Ansetzen der mit der roten Masse gefüllten Spritze an die Kanüle der linken ITA (*), im Bild (B) ist die Füllung der rechten ITA zu sehen (**). (C) zeigt das Präparat nach Abbinden der Masse. Bild (D) zeigt die mit Pfeilen markierten feinen Abgänge der linken ITA (weiß = A. intercostalis ant., schwarz = sternaler Abgang). S = Sternum

2.5.2 Arterienmasse nach Thiel für die makroskopische Präparation

Auf der Suche nach einer geeigneten Masse zur *Nachinjektion* am Thiel-fixierten Präparat (Thiel 1992), gelang es Walter Thiel eine Dextrin-Latex-Mennige-Masse herzustellen, die der Anforderung nach einer genügend hohen Fließfähigkeit gerecht werden konnte. Sowohl der hervorragende Röntgenkontrast, als auch die Anpasstheit des Materials an die eigens von ihm entwickelte Konservierungsflüssigkeit (Thiel 1991) ermöglichten eine unkomplizierte Injektion mit anschließender angiographischen Darstellung des Gefäßsystems (Thiel 1992).

Die zeitliche Abfolge dieses Versuches gliederte sich wie folgt:

- I. Vorbereitung des Präparates
 - Wenige Tage vor Injektion der Masse
- II. Herstellung der Masse
 - 1 Tag vor Injektion
- III. Instillation des Infusionssystems und Injektion
 - Am Tag der Injektion
- IV. CT-Aufnahme und
- V. Entnahme und Präparation des Thorax-Schildes
 - 7 Tage nach Applikation

I. Vorbereitung des Präparates

Als Untersuchungsmaterial stand eine 83 jährige Körperspenderin zur Verfügung (Tab. 5 – Spender-Nr. 4). Hinsichtlich der unter Punkt 2.2.2 aufgeführten Kostenintensität der Thiel-Fixierung, lag das Hauptaugenmerk der Vorbereitung des Präparates auf den Schutz aller anderen, nicht verwendeten anatomischen Strukturen, die für weitere klinische Kurse am Institut von Bedeutung sein könnten. Dazu wurde wenige Tage vor der Injektion mit der Präparation begonnen. Die paarige A. subclavia wurde freipräpariert und hinter dem Abgang der ITA mit einem Bindfaden abgebunden. Gleichfalls wurde die A. carotis communis auf beiden Seiten freipräpariert und vorsichtig abgeschnürt. Somit konnte die Infusion der Arterienmasse auf die Vorderwand des Thorax begrenzt werden. Als Zugang wurde die großlumige Aorta abdominalis gewählt, um ein größtmögliches Angebot der Masse während der Injektion zu gewährleisten.

II. Herstellung der Masse

Ein Tag vor Injektion wurde mit der Herstellung der Arterienmasse nach Thiel (1992) begonnen. Unter Abbildung 20 sind alle nötigen Materialien zur Herstellung der Masse gezeigt.

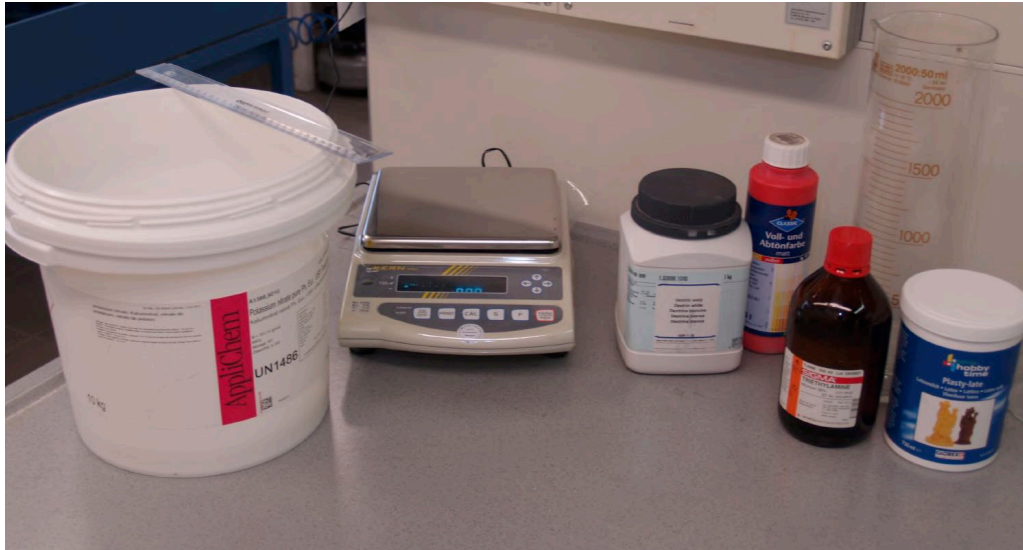


Abb. 20 | Materialien zur Herstellung der Arterienmasse (Thiel 1992) von links nach rechts: Anrühreimer; digitale Waage; Dextrin (weißer Behälter); Abtönfarbe rot (rote Flasche); Triethylamin (braune Flasche); Messzylinder; Latexmilch (nicht auf dem Bild gezeigt: Bleimennige)

Der Gebrauch von Handschuhen und Mundschutz während des gesamten Herstellungsprozesses war aufgrund der Dämpfe des Triethylamin und der staubigen Mennige erforderlich (Abb. 21 A). Zum weiteren Schutz der Atemwege wurden die einzelnen Komponenten unter Verwendung einer Punktabsaugung (Alsident[®] System, Alsident[®] System A/S, Hammel, Dänemark) verrührt. Zum Mischen eignete sich ein handelsüblicher Akku-Bohrschrauber (Abb. 21 B).

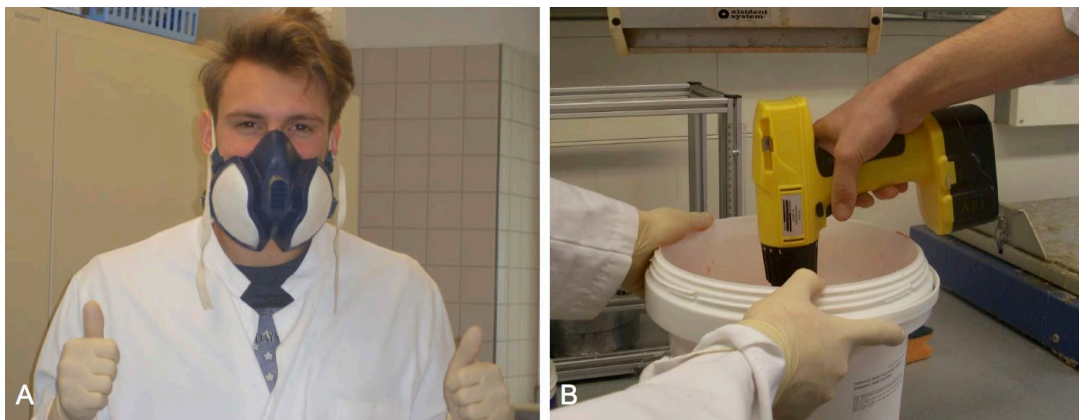


Abb. 21 | Herstellung der Arterienmasse nach Thiel (1992) unter der Verwendung von Mundschutz und Handschuhen (A). Zum Verrühren der viskösen Masse eignete sich die Verwendung eines Akku-Bohrschraubers (B).

Die Rezeptur der Masse wurde der Originalbeschreibung von Walter Thiel (1992) entnommen. Jedoch wurde nur die Hälfte der von Thiel (1992) angegebenen Gesamtmenge benötigt, da sich der Fokus dieser Untersuchung lediglich auf den Thorax des Körperspenders konzentrierte. Unter Tabelle 7 sind alle verwendeten Substanzen zur Herstellung der Arterienmasse aufgeführt.

Tab. 7 | Eigenschaften, Hersteller und Mengen der verwendeten Materialien der Arterienmasse Thiel (1992)

Substanz	Menge	Herstellerangaben	Eigenschaften
<i>1 Tag vor der Injektion der Arterienmasse</i>			
Dextrin, weiß	500 g	Merck, Darmstadt, Deutschland	Bindemittel
Destilliertes Wasser	500 ml	Apotheke Klinikum	Verdünnung
<i>Am Tag der Injektion der Arterienmasse</i>			
Destilliertes Wasser	500 ml	Apotheke Klinikum	Verdünnung
Triethylamin	125 ml	Sigma-Aldrich Chemie GmbH, München, Deutschland	Basisches Lösungsmittel
Mennige (Blei(II, IV)-oxid, Pb_3O_4)	750 g	Sigma-Aldrich Chemie GmbH, München, Deutschland	Farb- und Röntgenkontrastmittel
<i>Gründliches Umrühren und erst kurz vor Injektion der Masse Hinzufügen von</i>			
Latex	750 ml	Glorex of Switzerland Rheinfelden, Deutschland	Polymerisation/Festigkeit
Abtönfarbe rot	50ml	Obi, Wermelskirchen, Deutschland	Färbung

Die Menge der beschriebenen Masse entspricht der Hälfte der von Thiel (1992) im Originalrezept angegebenen Gesamtmenge.

Zunächst wurden 500 g Dextrin mit 500 ml destilliertem Wasser verrührt, bis eine homogene Masse entstanden ist. Diese ruhte 24 Stunden und wurde am Tag der

Injektion mit allen weiteren Zusätzen vermischt (Tab. 7). So wurden 500 ml destilliertes Wasser zusammen mit 125 ml Triethylamin unter die Masse gerührt. Triethylamin ist ein basisches Lösungsmittel und dient zur Verlängerung der Verarbeitungszeit der Masse. Genauer hemmte es die Polymerisation der Latexmilch, die am Ende hinzugegeben wurde. Als Farbstoff und Röntgenkontrastmittel wurden 750 g einer feinkörnigen Mennige (Blei(II, IV)-oxid, Pb_3O_4) vorsichtig beigelegt und gründlich verrührt. Unter Zugabe von 750 ml Latexmilch und 50 ml roter Abtönfarbe wurde die Masse fertiggestellt. Sobald die Latexmilch untergerührt wurde, begann die Verarbeitungszeit der Masse. Somit erfolgte dieser Schritt unmittelbar vor der Injektion. Durch ständiges Rühren des Gemisches wurde verhindert, dass die schwere, röntgenopake Mennige absank und sich ungleichmäßig verteilte.

III. Instillation des Infusionssystems und Injektion

Am Tag der Injektion wurde ein großlumiges Ventil in die eröffnete Aorta abdominalis gelegt und über einen Bindfaden und einer Klemme am Gefäß befestigt. Anschließend wurde das Infusionssystem mit dem Ventil verbunden (Abb. 22).

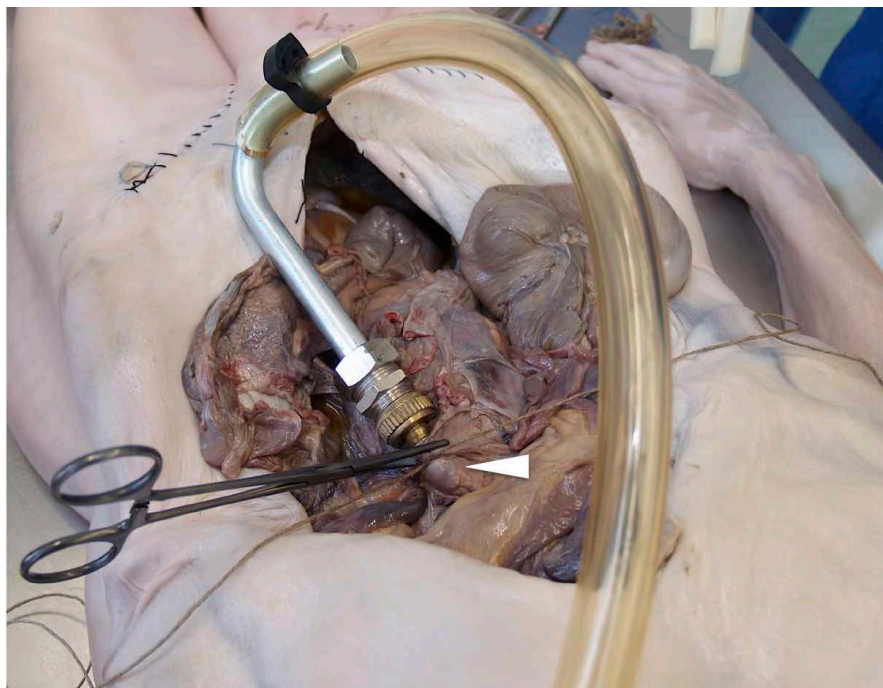


Abb. 22 | Anlage des Ventils mit Infusionssystem in die Aorta abdominalis (weißer Pfeil) nach kranial.

Sobald das Infusionssystem mit dem Spender verbunden war, wurden 750 ml der Latexmilch unter die Masse gerührt und unter ständigem Rühren in den Irregator gefüllt (Abb. 23 B). Die Klemme am Übergang des Behälters zum Infusionssystem wurde geöffnet und das Infusionssystem befüllt (Abb. 23 C). Die Klemmen am Präparat blieben zunächst geschlossen. Über eine Kurbel wurde der Irregator auf ca. 1 m über das Spenderniveau angehoben und die Klemmen zum Präparat geöffnet (Abb. 23 D).



Abb. 23 | Befüllen des Irregators und des Infusionssystems mit der Arterienmasse nach Thiel (1992). Bild (A) zeigt das Ventil. Im Bild (C) ist das mit der Masse gefüllte Infusionssystem kurz vor Injektion zusehen. Beide Klemmen sind noch geschlossen. Bild (B) zeigt den ebenfalls gefüllten Irregator, der zur Injektion über eine Kurbel (D, rechts unten) auf eine Höhe von 1 m über das Spenderniveau gebracht wird.

Innerhalb einer Stunde liefen so 1,5 l der Masse mit einem Perfusionsdruck von ca. 0,1 bar in das Gefäßsystem. Ca. 500 ml verblieben im Schlauchsystem und wurden verworfen. Im letzten Schritt der Anwendung wurde das Ventil entfernt und das Gefäß mit dem noch liegenden Bindfaden fest zusammengebunden. Alle verwendeten Materialien wurden gesondert entsorgt. Die Abbindezeit der Masse betrug eine Woche.

IV. CT-Aufnahme

Die CT-Aufnahme des Thorax wurde eine Woche nach Injektion der Arterienmasse angefertigt. Die Durchführung und die anschließende segmentierungsbasierte Rekonstruktion mittels Mimics® werden im Abschnitt 2.6.2 separat beschrieben.

V. Entnahme und Präparation des Thorax-Schildes

Nach einer Woche konnte das Thorax-Schild entnommen, präpariert und fotografisch dokumentiert werden (s. 2.4). Die Präparation der ITA wurde durch den kräftigen Farbkontrast und der erhöhten Festigkeit der polymerisierten Masse erleichtert (Abb. 24). So konnten auch Abgänge kleinen Durchmessers gefunden und präpariert werden (Abb. 24 D-F).

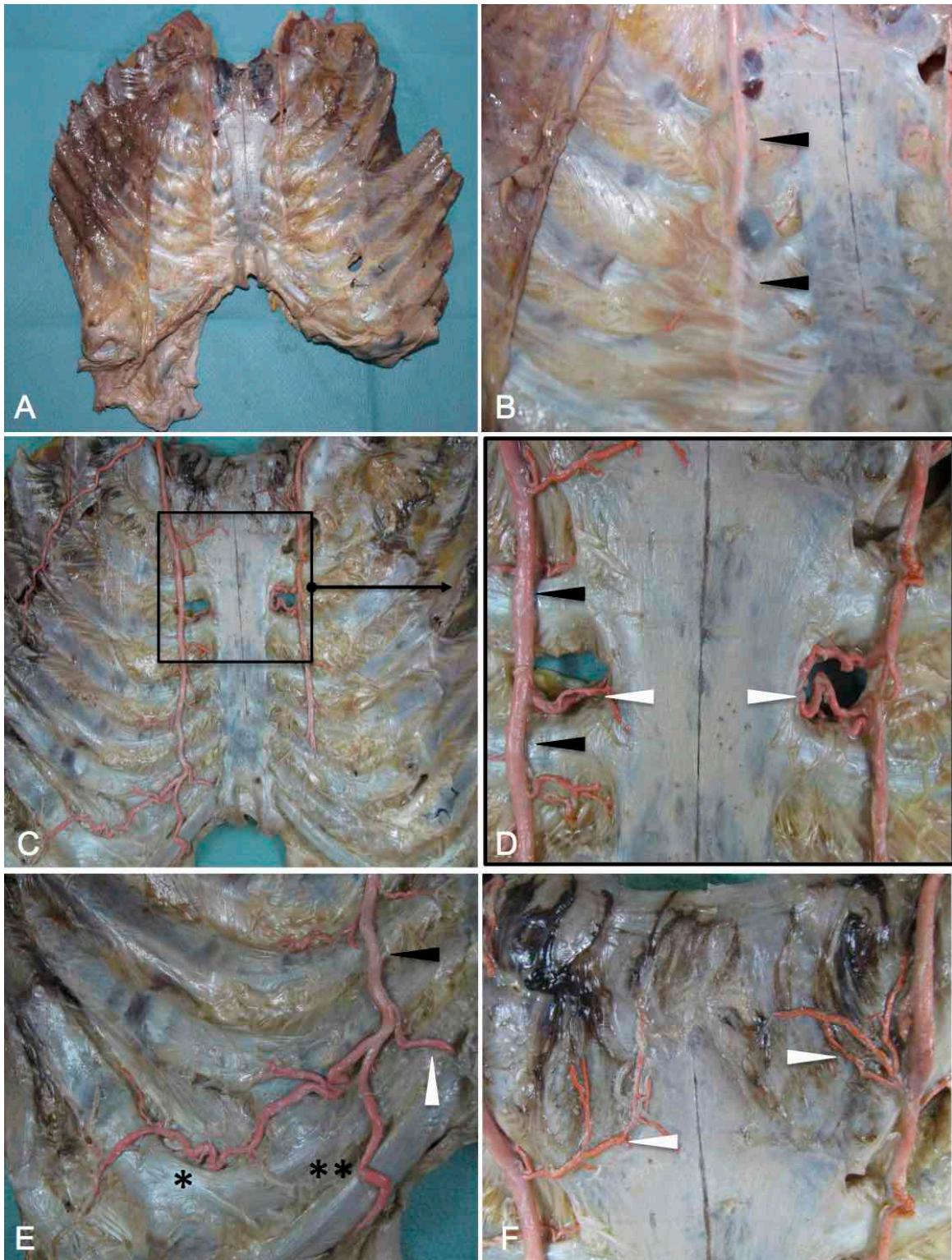


Abb. 24 | Thiel-fixiertes Thorax-Schild nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992). Bild (A) zeigt eine Übersichtsaufnahme des Thorax-Schildes nach der Entnahme. Durch den hohen Kontrast der Masse zum umliegenden Gewebe ist die ITA (schwarzer Pfeil) schon vor Beginn der Präparation gut zu erkennen (B). Bild (C) zeigt eine weitere Übersichtsaufnahme des Schildes nach der Präparation der ITA. Das schwarz umrahmte Feld ist im Bild (D) vergrößert abgebildet und zeigt zwei sternale Abgänge (weißer Pfeil) und die ITA. Im Bild (E) sind die A. musculophrenica (weißer *) und die A. epigastrica sup. (schwarzer *) zu sehen. Durch die gute Reichweite der Masse können auch recht feine Perforatoren bis zum Eintritt in das Manubrium sterni nachverfolgt werden (F).

2.6 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion mittels Mimics®

Mimics®, Materialises Interactive Medical Image Control System, ist ein spezielles Bildbearbeitungsprogramm der Firma Materialise HQ (Leuven, Belgien), das 2D-Bild-Dateien mit 3D-Anwendungen koppelt (Materialise 2016). So können beispielsweise CT-Aufnahmen mittels Mimics® segmentiert, dreidimensional rekonstruiert und über weitere Anwendungen als Modell ausgedruckt werden. Alle Bild-Dateien einer CT werden im medizinischen Bereich ausschließlich in Form des standardisierten *Digital Imaging and Communications in Medicine*, kurz DICOM-Format (DICOM 2016) gespeichert und können von Mimics® gelesen werden.

Sobald ein CT-Datensatz importiert wurde, können durch die Verwendung verschiedener Werkzeuge Gewebe und Strukturen semi-automatisch voneinander separiert werden. Die Unterscheidung der verschiedenen Gewebe im CT, wie bspw. Knochen- von Weichgewebe, basiert auf unterschiedlichen Grauwerten der einzelnen Pixel im Bild (Hirschfeld 2017). Der Grauwert eines Pixels wird unter anderem durch den Abschwächungskoeffizienten des jeweiligen Gewebes bestimmt (Levi et al. 1982). Wiederum ist der Grad der Abschwächung einer Röntgenstrahlung von der Dichte und Dicke des durchstrahlten Gewebes abhängig. So kann jedes Pixel im CT-Bild einem bestimmten Wert, einer HU (Hounsfield Unit) zugeordnet werden (Lamba et al. 2014). Die Hounsfield-Skala, die hauptsächlich 4069 Graustufen unterscheidet, ermöglicht so eine schnelle und einfache Charakterisierung bestimmter Gewebe anhand ihrer Graustufen im CT. Basierend auf dieser Skala besitzt Mimics® vordefinierte Schwellenwerte für Gewebe, die es dem Benutzer ermöglichen, verschiedene Gewebe mit wenig Mühe von anderen zu separieren (automatische Segmentierung). So besitzt bspw. Knochengewebe einen Bereich von 226 bis 1618 HU, wobei der niedrigste Wert der Skala mit -1024 HU Luft, und der höchste mit 3071 HU Zahnschmelz darstellt (Abb. 25 A). Mit Hilfe des Werkzeugs „Thresholding“ kann der Bereich bspw. für Knochengewebe ausgewählt und mit einer Segmentierung begonnen werden (Abb. 25 B).

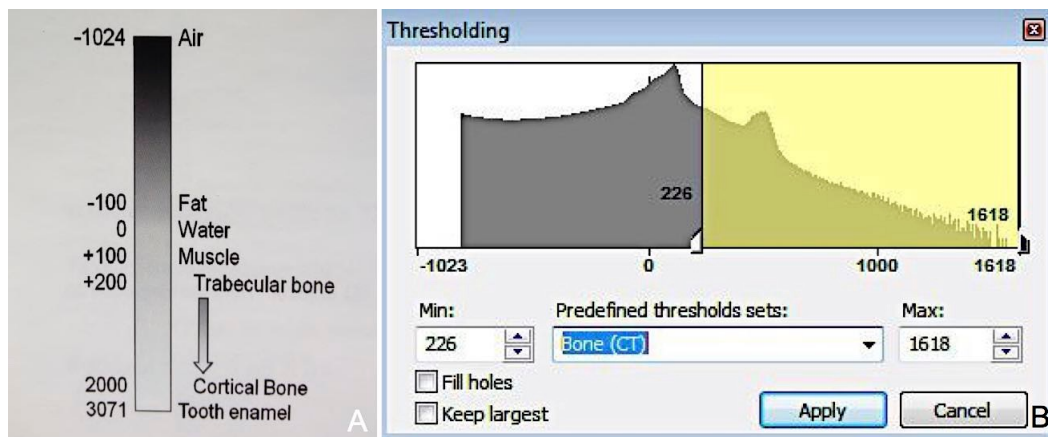


Abb. 25 | Die Hounsfield-Skala (A, Handbuch Materialise Mimics Innovation Suite 18.0 Research) ist so skaliert, dass Wasser den Wert 0 HU und Luft den Wert -1024 HU besitzt. Im Bild (B) ist beispielhaft der von Mimics® vordefinierte Grenzbereich für Knochengewebe gezeigt; jedes Pixel mit einer Graustufe von 226 bis 1618 HU wird nachfolgend im CT gelb markiert.

Das Programm markiert nun alle Pixel der gesamten CT-Aufnahme in einer bestimmten Farbe, deren Graustufen im ausgewählten Grenzbereich liegen und speichert diese Auswahl als ‚Maske‘ in der definierten Farbe ab (Abb. 26 A). Diese Maske lässt sich dann dreidimensional berechnen und als Modell darstellen (Abb. 26 B).

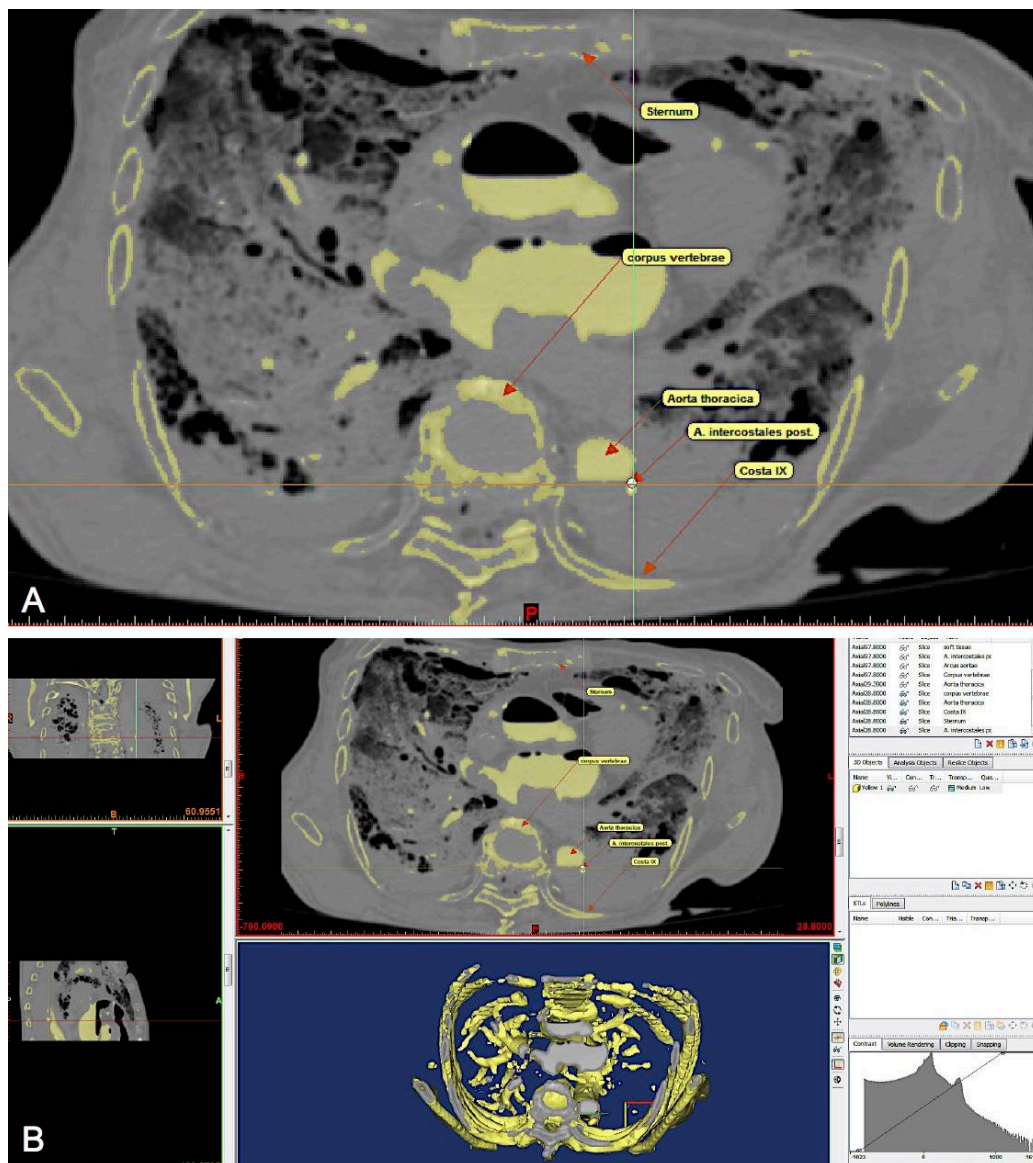


Abb. 26 | Segmentierung des knöchernen Thorax einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Kontrastmittel-CT. Bild (A) zeigt die gelb markierten Pixel, die in dem zuvor ausgewählten Grenzbereich für Knochengewebe fallen, dabei sind auch die mit einem Kontrastmittel gefüllten Arterien, wie die Aorta thoracica und die A. intercostalis post., gelb markiert (rote Pfeile). Basierend auf dieser Auswahl von Pixel berechnet Mimics® ein 3D-Modell des Thorax (B unten rechts).

Auf diese Weise können beliebig viele Masken mit definierten Graustufenbereichen erstellt und farblich in der CT unterschieden werden. Jede Maske kann wiederum ein- und ausgeblendet werden, sodass man sich segmentierte Gewebe und Strukturen einzeln dreidimensional ansehen und bearbeiten kann. Es ist auch ohne die Verwendung von vordefinierten gewebespezifischen Grauwertbereichen des Programms möglich eine CT mittels „Thresholding“ zu segmentieren (semi-automatische Segmentierung). So kann zusätzlich entweder das Werkzeug

„Density“, mit dem man die Durchschnittsdichte eines beliebig großen Bereichs messen kann (Abb. 27 A), oder „Profile Lines“, um die Dichte der Pixel entlang einer selbstgezogenen Linie des CT-Bildes zu bestimmen, genutzt werden (Abb. 27 B). Anhand der gemessenen HU- Werte können individuell Grenzwerte von Graustufen für Gewebe in „Thresholding“ festgelegt werden.

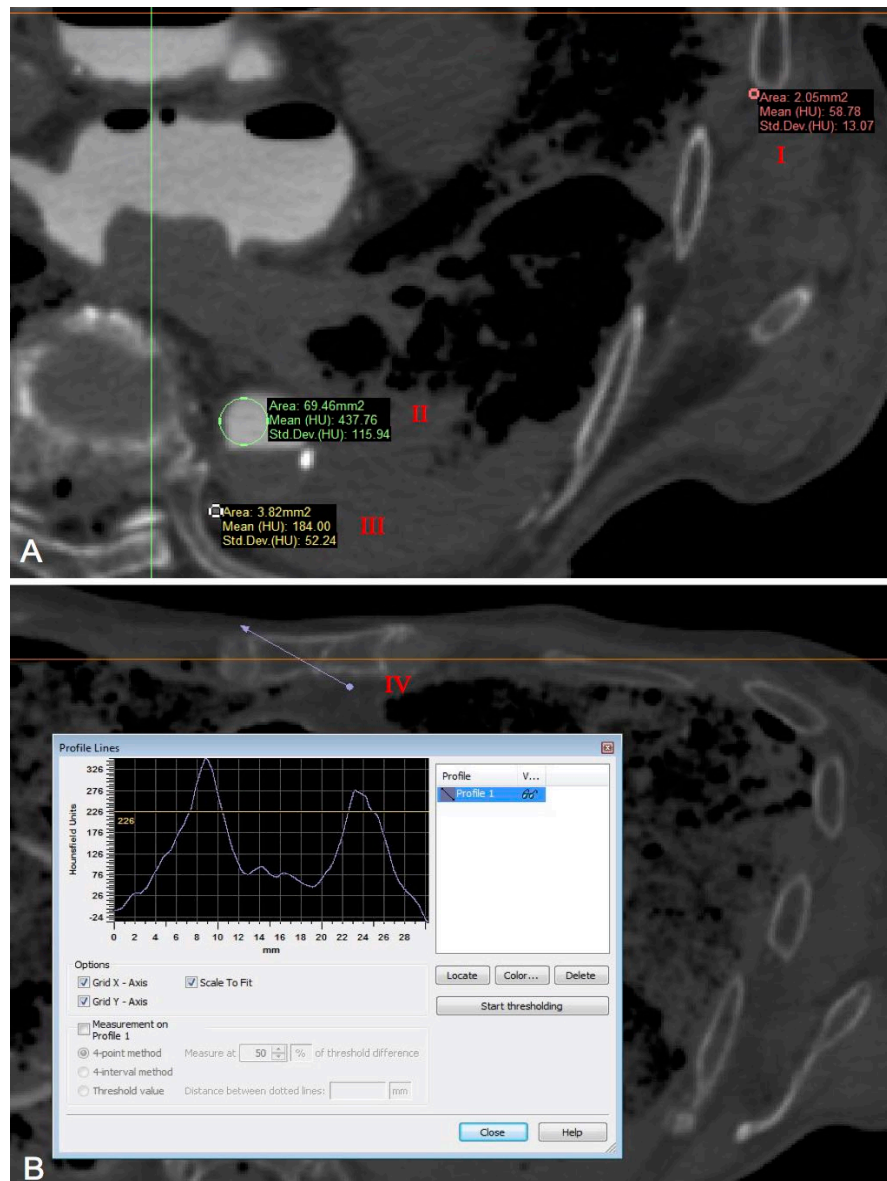


Abb. 27 | Dichtemessung mit Mimics® am Beispiel einer Kontrastmittel-CT einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin. Bild (A) zeigt die Verwendung des Werkzeuges „Density“. Mit einem größenverstellbaren Kreis lässt sich ein beliebiger Bereich der CT in HU messen ,z.B. des Kontrastmittels in I=A. intercostales ant, 58,78 HU; II=Aorta, 437,76 HU; III=A. intercostalis post.,184 HU. Im Bild (B) ist die Verwendung der „Profile Lines“ gezeigt. Dabei wird die Dichte entlang eines selbstgezogenen Pfeils(IV) gemessen und in einem Diagramm dargestellt (Fenster „Profile Lines“).

Wenn die Segmentierung bestimmter Strukturen mittels „Tresholding“ auf Grund von Überschneidung der Grenzwerte einzelner Gewebe nicht möglich ist, kann das Werkzeug „Multiple Slice Edit“ verwendet werden (manuelle Segmentierung). Auf diese Weise kann eine bestimmte Struktur im Bild mit dem Mauspfeil umfahren und markiert werden (Abb. 28). Der Nachteil dieses Werkzeuges ist jedoch, dass die jeweilige Struktur Bild für Bild nachgezeichnet werden muss, um später ein zusammenhängendes 3D-Modell erzeugen zu können.

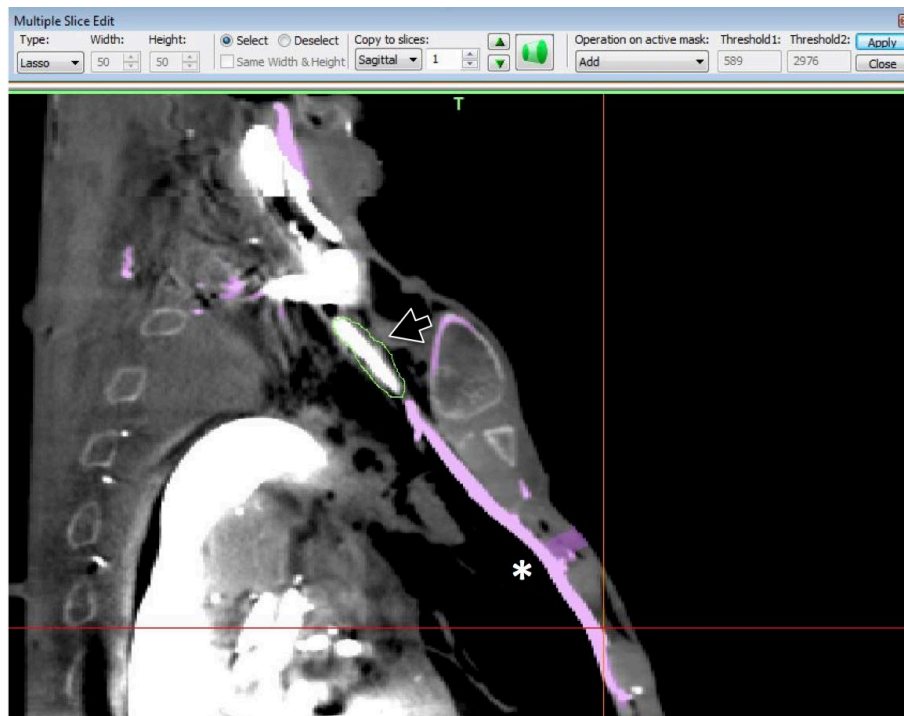


Abb. 28 | Verwendung des Werkzeuges „Multiple Slice Edit“ am Beispiel der ITA einer 83 Thiel-fixierten Spenderin. Der grün umrahmte Bereich im Bild (Pfeil) wurde nachgezeichnet. Nach einem Klick auf das Feld „Apply“ (oben rechts) werden alle Pixel innerhalb des manuell gezogenen Bereiches in der violetten Farbe der ITA (*) markiert und gespeichert.

2.6.1 Kontrastmittel-CT

Das Ziel dieses Versuches war es herauszufinden, ob sich Kollateralkreisläufe des Sternums mittels Kontrastmittel-CT und anschließender Segmentierung darstellen lassen. Dazu wurden einer 83 jährigen Körperspenderin (Tab. 5 – Spender-Nr. 5) beide ITAs, im Sinne einer bilateralen Entnahme der ITA nach einer Bypass-Operation, abgebunden und eine Kontrastmittel-CT durchgeführt.

Abbinden der ITA und der A. epigastrica superior

Zur Darstellung der paarigen ITA wurden auf Höhe des ersten ICRs parasternal zwei 3 cm lange Horizontalschnitte gesetzt und stumpf in die Tiefe präpariert, bis die Intercostalmuskulatur zu sehen war. Die Muskulatur wurde mit einem stumpfen Skalpell soweit gespalten, bis die ITA zu sehen war (Abb. 29 A). Unterhalb des Gefäßes wurde zum Abbinden ein Bindfaden gelegt (Abb. 29 B). Um die Entnahme der ITA zu simulieren, wurde im nächsten Schritt die A. epigastrica superior freipräpariert. Hierzu wurde durch einen ca. 4 cm langen Längsschnitt die Haut und das obere Blatt der Rectusscheide eröffnet, der M. rectus abdominis gespalten, die Fascies transversalis, welche das Gefäß umgibt, eröffnet und ein Bindfaden unter das Gefäß gelegt (Abb. 29 C). Die liegenden Bindfäden wurden verknotet, wodurch die ITA im Sinne einer bilateralen Entnahme abgebunden war.

Anlage des Infusionssystems und Kontrastmittel-CT

Da die A. femoralis schon als Zugang für die Fixierung der Spenderin diente, ließen sich die rechte A. - und V. femoralis problemlos mit zwei großlumigen Kathetern (18 Charrière, Virtangio® Tubing Set, Fumedica, Switzerland) – rot für die Arterie, blau für die Vene (Abb. 29 D) – rekanülieren und durch Bindfäden geführte Stopper am jeweiligen Gefäß fixieren (Abb. 29 E). Während der Tomograph (MX 6000 Dual, Philips, Amsterdam, Niederlande) aufheizte, wurde die Kontrastmittel-Lösung nach Herstellerangaben hergestellt. 210 ml eines Kontrastmittels (Angiofil® 6% Macro, Fumedica, Muri, Switzerland) wurden in 4,5 l eines Lösungsmittels (Parafinöl) aufgelöst. Anschließend wurde das Infusionssystem an die kompatible Pumpe (Virtangio® Machine, Fumedica, Muri, Switzerland) angeschlossen und mit dem Kontrastmittel befüllt. Die Spenderin wurde nach Instillation auf den CT-Tisch gelegt (Abb. 29 F).

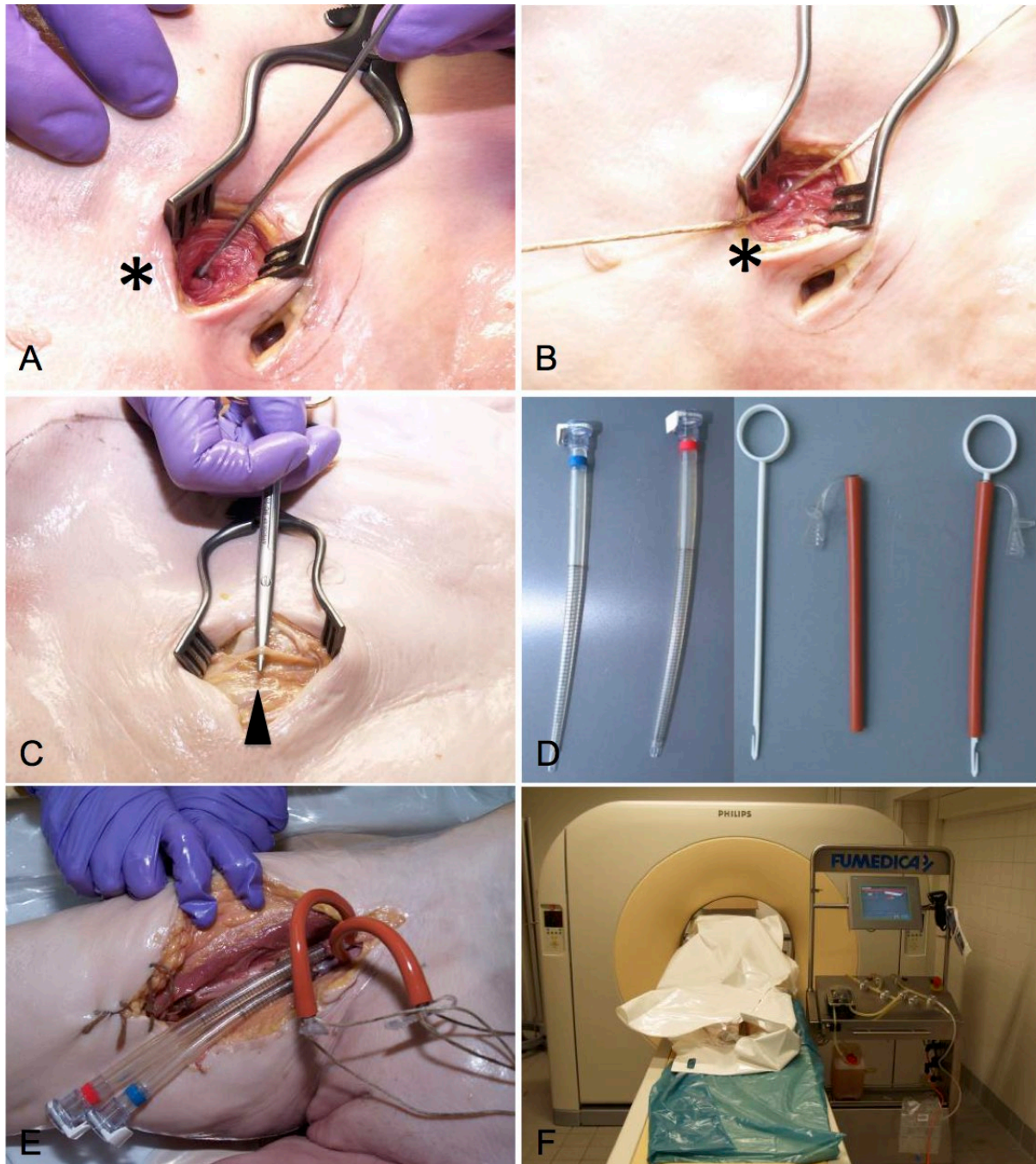


Abb. 29 | Kontrastmittel-CT des Thorax einer Thiel-fixierten 83 jährigen Körperspenderin nach Unterbinden des Stromgebietes der ITA. Im Bild (A) ist die freipräparierte ITA dargestellt (*), bevor sie mit einem Bindfaden abgebunden wird (B). Bild (C) zeigt die freipräparierte A. epigastrica sup (schwarzer Pfeil). Die im Bild (D) gezeigten Kanülen werden zur Injektion des Kontrastmittels in die A./V. femoralis dextra gelegt (E). Lagerung der Körperspenderin und Kontrastmittel-CT des Thorax (F).

Mit Hilfe eines Prozessvisualisierungssystem (SIMATIC WinCC flexible Runtime, Siemens, Berlin/München, Deutschland), konnte die Untersuchung vom Kontrollraum aus navigiert werden. Das CT durchlief dabei drei Phasen:

1. Arterielle Phase: dreigeteilte Aufnahme des Thorax (11 cm Höhe/Teilaufnahme) bei einer Kontrastmittel-Gabe von 1200 ml
2. Venöse Phase: Übersichtsaufnahme; Gabe von 1800 ml Kontrastmittel
3. Arterielle Phase: Übersichtsaufnahme; Gabe von weiteren 500 ml des Kontrastmittels

Die so gewonnenen CT-Bilder wurden anschließend gesichert und mittels Mimics® (Materialise Mimics Innovation Suite 18.0 Research) ausgelesen. Ein neues „Projekt“ wurde anschließend im System angelegt (Abb. 30).

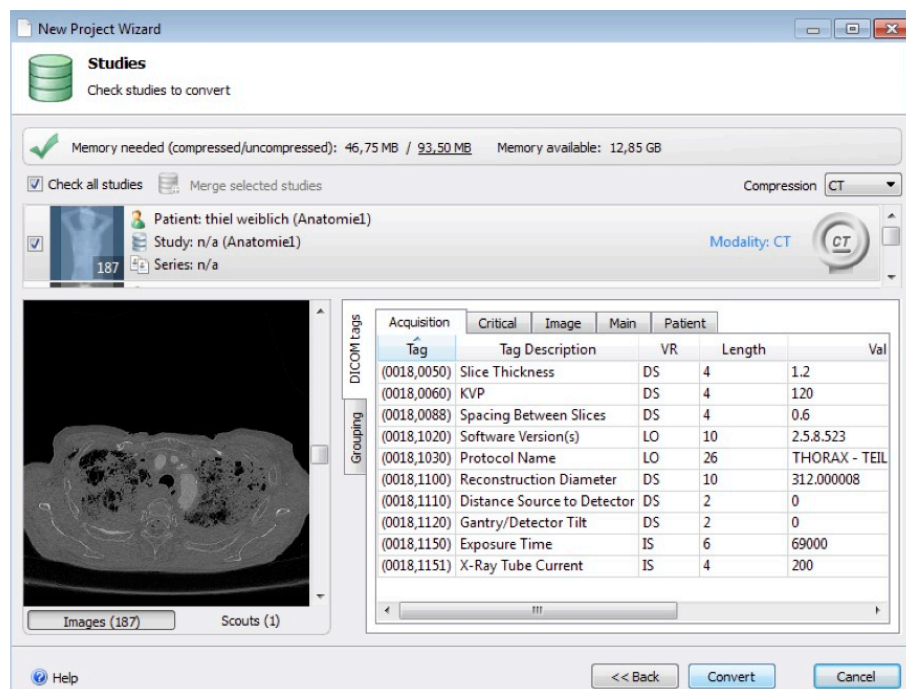


Abb. 30 | Auslesen eines CT-Datensatzes und Erstellen von neuen Projekten in Mimics®.

Nachdem der Datensatz, bestehen aus 187 Einzelbildern, eingelesen und ein neues Projekt angelegt wurde, konnte vor Beginn der Segmentierung ein Übersichtsmodell des Thorax erstellt und in allen drei Eben betrachtet werden (Abb. 31).

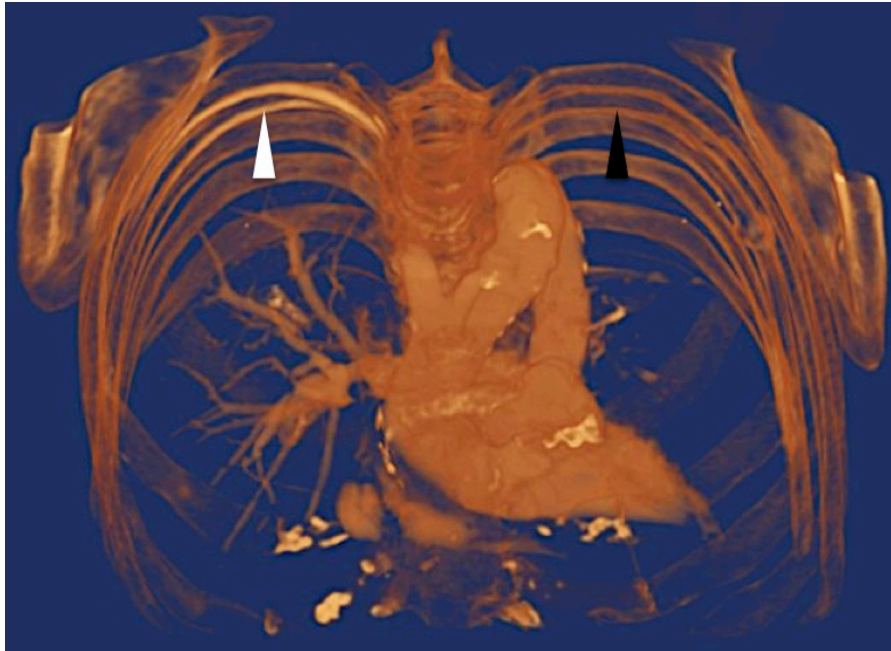


Abb. 31 | Übersichtsmodell des zuvor konvertierten Datensatzes der Kontrastmittel-CT einer 83-jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin. Die Aa. intercostales posteriores sind rechtsseitig (weißer Pfeil) durch den hohen Röntgenkontrast bereits in der Übersicht angedeutet, wohingegen linksseitig kaum ein Kontrast zu erkennen ist (schwarzer Pfeil).

In Abbildung 32 ist ein Bildausschnitt der Segmentierungsarbeit mit Mimics® des Thorax dargestellt. Die Bearbeitung des Datensatzes erfolgt in drei Ebenen: Frontal-, Transversal- und Sagittalebene. Während der Bearbeitung lassen sich bereits segmentierte Strukturen dreidimensional darstellen, betrachten und zur besseren Übersicht aus- und einblenden. Mimics® enthält neben den in Kapitel 2.6 beschriebenen Werkzeugen weitere Funktionen, die es je nach Anforderungsprofil ermöglichen eine bestimmte Struktur zu segmentieren. Zur Segmentierung des Thorax nach Kontrastmittel-CT sind alle verwendeten Werkzeuge unter Kapitel 2.6 aufgeführt und beschrieben.

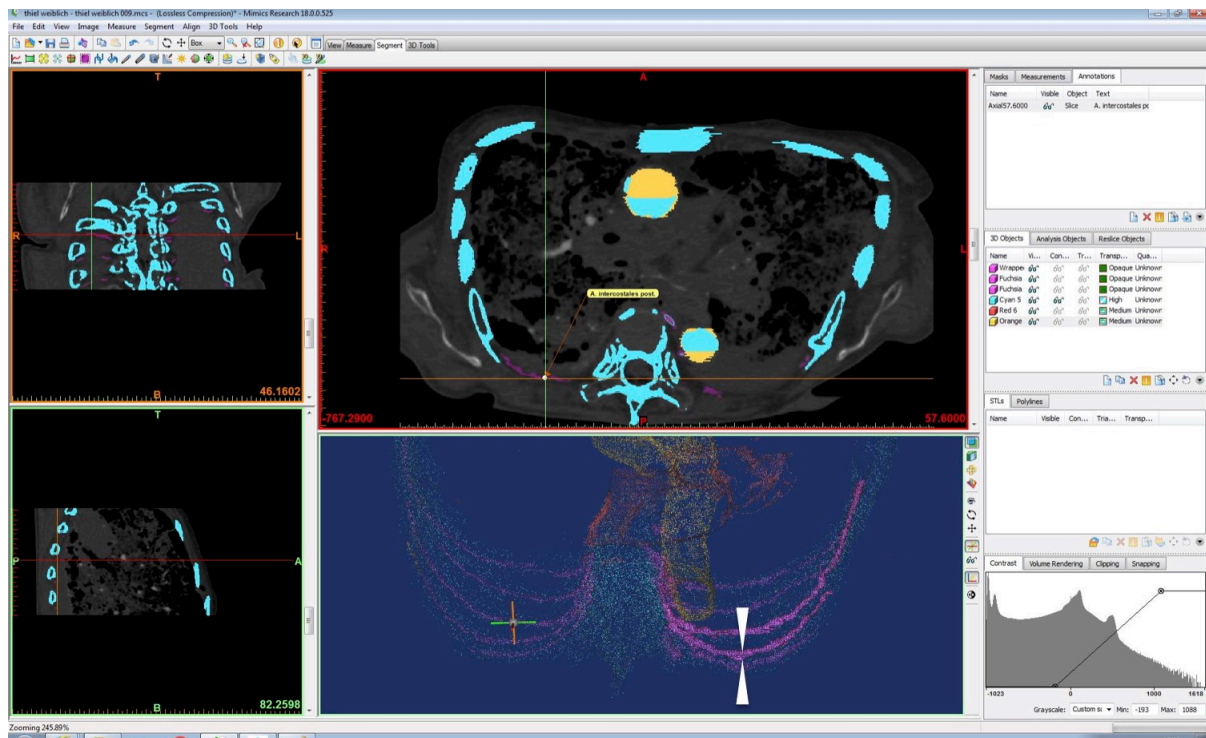


Abb. 32 | Bildschirmfoto während der Segmentierung mit Mimics® des Thorax einer 83-jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin. Unten im Bild wird das bereits segmentierte und dreidimensional rekonstruierte Modell des Thorax auf blauem Hintergrund angezeigt. Durch Veränderung der Transparenz von segmentierten Strukturen, können Gewebe hervorgehoben oder in den Hintergrund gesetzt werden (weißer Pfeil = A. intercostalis post.).

2.6.2 Arterienmasse nach Thiel für die Computertomographie

Da die Mennige (Blei(II,IV)-oxid) der Arterienmasse Thiels (1992) eine hohe Röntgenopazität aufweist, konnte die Körperspenderin (Tab. 7) nach dem Aushärten der Masse (s. 2.5.2) ohne weiteres computertomographisch untersucht werden. Die CT wurden ebenfalls mit dem Tomographen der Firma Philips (MX 6000 Dual, Philips, Amsterdam, Niederlande) und der gleichen Einstellung angefertigt (s. 2.6.1). Der CT-Datensatz wurde nach dem Scan mittels Mimics® (Materialise Mimics Innovation Suite 18.0 Research) ausgelesen und als neues „Projekt“ gespeichert. Bevor mit der Segmentierung begonnen wurde, ließ sich ein dreidimensionales Übersichtsmodell des Thorax erstellen. In Abbildung 33 ist die ITA bereits deutlich erkennbar.

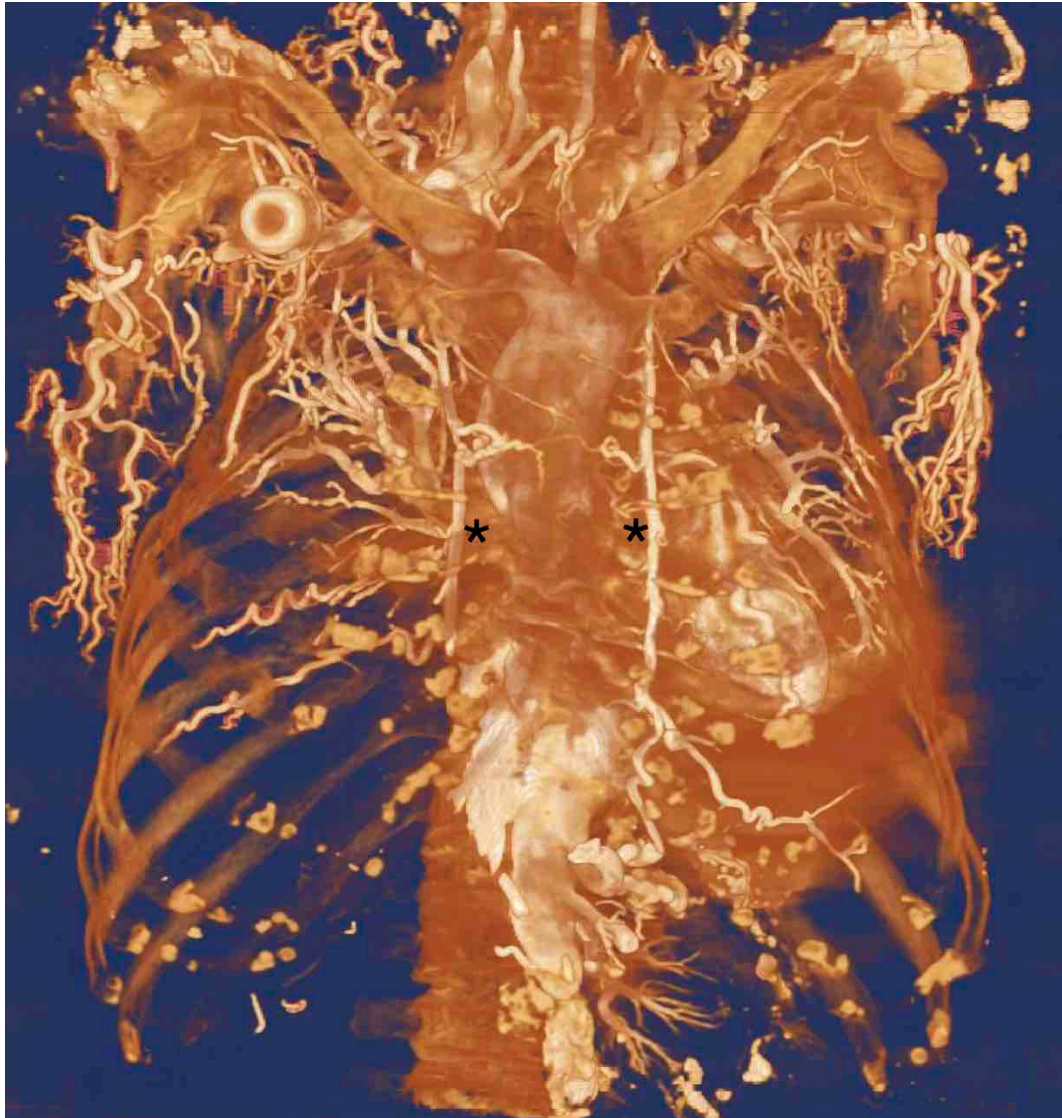


Abb. 33 | Übersichtsmodell der Thorax-CT einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992). Die ITA (*) ist auf dem Bild bereits gut erkennbar.

Anschließend wurde der Thorax des Körperspenders segmentierungsbasiert rekonstruiert (Abb. 34). Mimics® enthält neben den in Kapitel 2.6 beschriebenen Werkzeugen weitere Funktionen, die es je nach Anforderungsprofil ermöglichen eine bestimmte Struktur zu segmentieren. Zur Segmentierung des Thorax nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992) sind alle verwendeten Werkzeuge unter Kapitel 2.6 aufgeführt und beschrieben.

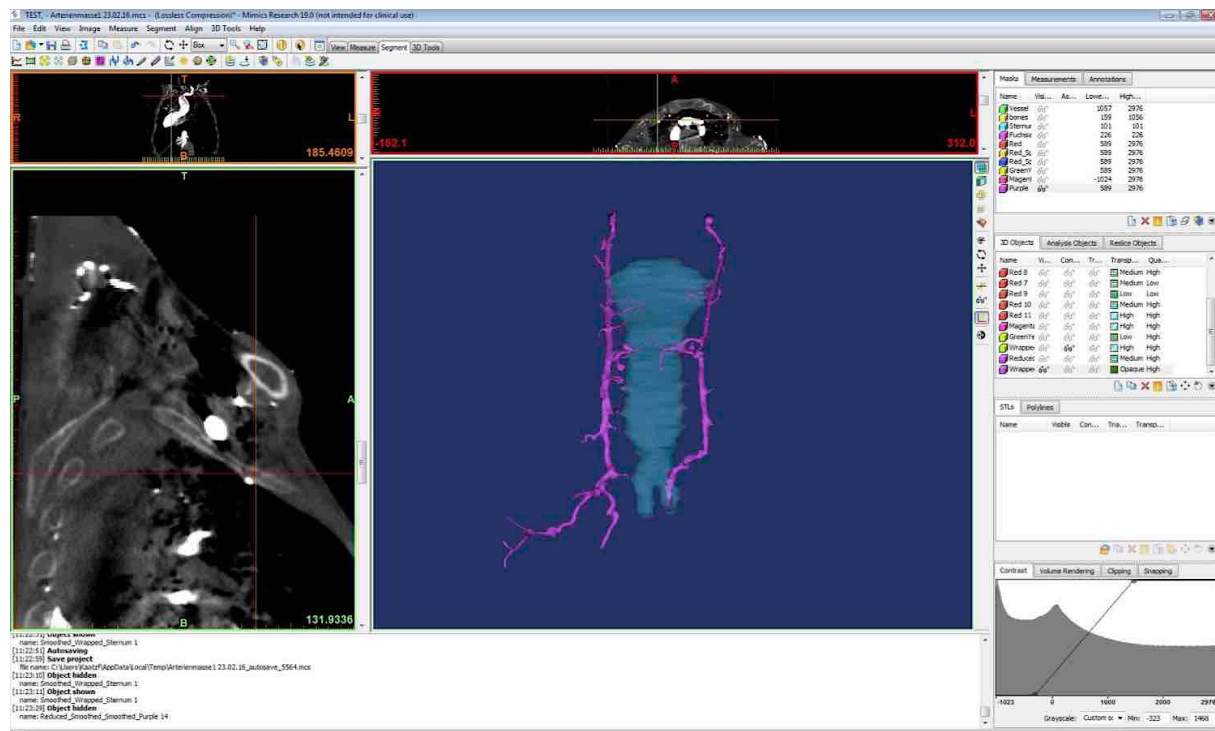


Abb. 34 | Segmentierungsbasierte Rekonstruktion (Mimics®) der ITA (lila) und des Sternums (türkis) einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin – Ansicht von dorsal

2.7 Semi-quantitative Beurteilung der Methoden

Um die einzelnen Methoden besser miteinander vergleichen zu können, wurde ein Bewertungssystem erstellt. Alle Kriterien zur Beurteilung und die Gestaltung der Tabelle wurden vom Autor selbst gewählt. Jede Tabelle unterscheidet zwischen 6 Kriterien. Diesen Kriterien wurden positive oder negative Werturteile zugeordnet und in Punktwerte übersetzt. Bei der makroskopischen Präparation wurden andere Kriterien gewählt, als bei der segmentierungsbasierten Rekonstruktion. Da beiden Methoden sehr unterschiedliche Eigenschaften und Grundvoraussetzungen unterliegen. Es erscheint daher sinnvoll, diese beiden Teile der Arbeit voneinander getrennt zu bewerten, da es bei der Beurteilung der Rekonstruktion am PC bspw. um den Röntgenkontrast oder um die Reichweite der jeweiligen Injektionsmasse geht. Dagegen sind bei der makroskopischen Präparation vielmehr die Präparierfähigkeit oder die Beschaffenheit der Weichgewebe in Abhängigkeit von der jeweiligen Fixierung von hoher Relevanz.

Zur Beurteilung eines Kriteriums konnte zwischen ungenügend (- -), ausreichend (-), befriedigend (0), gut (+) und sehr gut (+ +) bewertet werden. Dabei entspricht das

jeweilige Werturteil einer bestimmten Punktzahl: bspw. ergibt ‚ungenügend‘ (- -) die Punktzahl 1 und das mit ‚sehr gut‘ (+ +) beurteilte Kriterium 5 Punkte. Summiert man die Punkte aller Kriterien, ergibt sich eine Gesamtpunktzahl von mind. 5 bis max. 30 Punkten. Ein Punkte-Noten-Schlüssel ermöglicht nun die Umrechnung der Gesamtpunktzahl in eine Note. Die Notenskala reicht von Note 1 (sehr gut) bis Note 5 (ungenügend):

$$\frac{\text{Gesamtpunktzahl/Methode}}{30 (\text{max. Punktzahl})} \times 100 = x \%$$

- 100% - einschließlich 90% = Note 1
- unter 90% - einschließlich 75% = Note 2
- unter 75% - einschließlich 60% = Note 3
- unter 60% - einschließlich 45% = Note 4
- unter 45% = Note 5.

Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien kurz erläutert.

Kriterien zur Beurteilung der makroskopischen Präparationen

Bei der Beurteilung der Präparation von Alkohol- und Thiel-fixierten Thorax-Schilden lag das Augenmerk u.a. auf der Präparierfähigkeit der Weichgewebe, besonders der ITA und ihrer feinen Abgänge. Folgende Kriterien wurden zum Vergleich gewählt:

- Präparierfähigkeit der Weichgewebe
- Flexibilität der Weichgewebe
- Farbkontrast der Weichgewebe zueinander
- Präparierfähigkeit der ITA und ihrer Abgänge
- Flexibilität der ITA und ihrer Abgänge
- Farbkontrast der ITA und ihrer Abgänge zum umliegenden Gewebe

Kriterien zur Beurteilung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mittels Mimics® nach Anwendung von Injektionsmassen

Die Beurteilung dieser Darstellungsmethode orientierte sich an der Handhabung und Reichweite beider Injektionsmassen (Kontrastmittel, Arterienmasse Thiels) am Präparat und der anschließenden segmentierungsbasierten Rekonstruktion mit Mimics®. Dabei wurden folgenden Kriterien zum Vergleich herangezogen:

- Handhabung/Applikation der Injektionsmasse
- Röntgenkontrast der Injektionsmasse
- Reichweite der Injektionsmasse im Gefäßsystem
- Dauer der Segmentierung am PC
- Qualität der Segmentierungsbasierte Rekonstruktion
- Wiederverwendbarkeit des Körperspenders nach Segmentierung

Auf diese Weise war es möglich, jede Methode zu beurteilen und anschließend zu vergleichen. Die Punktevergabe erfolgte durch den Anwender selbst und unterlag damit einer gewissen Subjektivität.

2.8 Systematische Literaturrecherche

Die systematische Literaturrecherche erfolgte über die medizinischen Datenbanken PubMed und des Web Of Science und hatte folgende Ziele:

- Überblick über die vorliegenden Literatur verschaffen
- Wissenschaftliche Relevanz des Themas identifizieren
- Auswahl der themenspezifischen Literatur
- Forschungsfragen formulieren
- Diskussionsgrundlagen schaffen

Zur Auswahl und Auswertung der themenspezifischen Fachliteratur waren präzise Suchbegriffe und ein systematisches Vorgehen nötig. Zu dieser Thematik bietet die Universitätsbibliothek Leipzig regelmäßig fachspezifische Schulungen für Medizin,

Veterinärmedizin, Naturwissenschaften und Psychologie an, die datenbankspezifisch ausgerichtet sind und dem Promovenden helfen Suchbegriffe korrekt und präzise zu formulieren und die spezifische Literatur zu verwalten (Universitätsbibliothek Leipzig 2018).

Durch die Bereitstellung von Schulungsmaterial für die Literaturrecherche mit PubMed und dem Web Of Science erhält der Promovend einen Leitfaden zur systematischen Formulierung genauer Suchanfragen, den Umgang und der Verwaltung der gewonnenen Suchergebnisse und der Vereinfachung der bereits durchgeführten Suche (Wöckel 2017). Jede Suchanfrage erfolgte in englischer Sprache. Durch die Verwendung der Operatoren OR, AND oder NOT konnten verschiedene Suchbegriffe einer Suchanfrage miteinander verknüpft und das Suchergebnis angepasst werden. Bspw. ließen sich die Begriffe *Thiel* und *Injection* durch den Operator AND miteinander verknüpfen, sodass im Suchergebnis alle Fachartikel angezeigt wurden, die beide Begriffe enthielten. Andere Operatoren, wie Phrasieren oder Klammersetzung helfen die Suche weiter zu spezifizieren (Wöckel 2017). Das Suchergebnis konnte in der jeweiligen Datenbank gespeichert und weiter eingeschränkt werden. Nachfolgend ist ein Beispiel der systematischen Literaturrecherche gezeigt:

Auf Grundlage des Themas Arterienmasse nach Thiel (1992) und deren Anwendung am Humanpräparat, wurden zunächst die Schlagwörter „mass“, „Thiel“ und „Injection“ gewählt. Wie von Wöckel (2017) beschrieben, wurden zur logischen Verknüpfung der Schlagwörter die Operatoren AND und Klammersetzung verwendet, wodurch der Suchbegriff „(mass after Thiel) AND injection“ formuliert wurde. Dadurch ließen sich nur die Studien finden, die alle drei oben genannten Schlagwörter enthielten.

Unter dem Suchbegriff „(mass after Thiel) AND injection“ konnten über die Datenbank PubMed vier Studien gefunden werden. Bei Verwendung des gleichen Suchbegriffes in der Datenbank des WEB OF SCIENCE ließen sich drei Studien finden (Abb. 35).

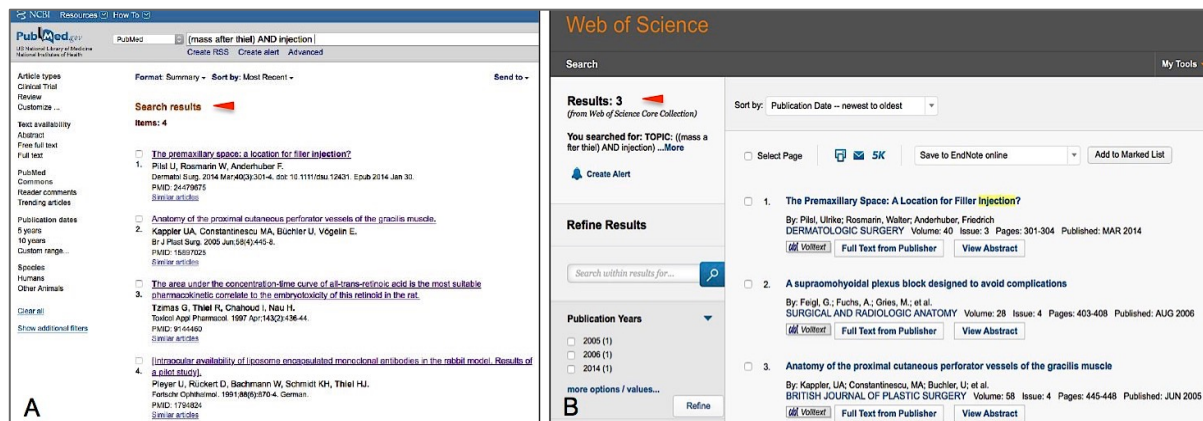


Abb. 35 | Suchergebnisse nach Eingabe des Suchbegriffes „(mass after thiel) AND injection“ in den medizinischen Datenbanken PubMed (A) und des WEB OF SCIENCE (B). Es konnten via PubMed 4 und des WEB OF SCIENCE 3 Artikel gefunden werden (rote Pfeile).

Dieser Suchbegriff erschien somit als der sinnvollste, da mit diesem Begriff über beide Datenbanken insgesamt nur sieben Studien gefunden worden, wobei zwei Studien aus der Recherche über PubMed auch im Suchergebnis des Web of Science erschienen (Abb. 35). Demzufolge konnten über die Suchanfrage fünf verschiedene Studien gefunden werden. Da nicht alle Studien dem Forschungsprofil der vorliegenden Studie entsprachen, wurden nach Beendigung der Suche alle Abstracts mit den im Suchbegriff enthaltenen Schlagwörtern „thiel“, „injection“ und „mass“ durchsucht, wobei die in Tabelle 8 aufgeführten Studien übrig blieben und der Methodik der vorliegenden Arbeit ähnelten.

Tab. 8 | Themenspezifische Studienauswahl

Autor	Titel	Jahr	Fachzeitschrift	Institut
Pils et al.	The Premaxillary Space: A Location for Filler Injection?	2014	Dermatologic Surgery	Institut für Anatomie, medizinische Universität Graz
Kappler et al.	Anatomy of the proximal cutaneous perforator vessels of the gracilis muscle	2005	British Journal of Plastic Surgery	Abteilung für Orthopädie, Plastische, Rekonstruktive und Handchirurgie, Universität Bern

2.9 Statistische Auswertung

Die Länge der jeweiligen ITA und die Anzahl ihrer Abgänge wurden zur statistischen Auswertung notiert und grafisch dargestellt. Dazu wurden alle Messergebnisse aus Kapitel 3.1 in das Programm Excel 2011 übertragen und als Diagramme dargestellt (Abb. 36 und Abb. 37). Weiter wurden aus der Menge der Messwerte das Minimum, das Maximum und das arithmetische Mittel bestimmt.

2.10 Fotografische und bildliche Dokumentation der Präparate

Alle präparierten Thorax-Schilde der vorliegenden Arbeit wurden fotografisch dokumentiert und skizziert. Zur Fotografie anatomischer Präparate sind ein hohes Maß an Präzision und Kenntnisse über die Einstellung der Kamera und des Lichtes nötig. Eine Anleitung für die anatomische Fotografie wurde in der Promotionsarbeit von Knepper (2017) erarbeitet, wodurch auch ein Laie gute fotografische Ergebnisse von anatomischen Präparaten erzeugen kann. Orientierend an dieser Beschreibung wurden alle Aufnahmen mit einer Spiegelreflexkamera (Olympus E-500, Tokio, Japan) und einer Digitalkamera (Canon Digital IXUS 200 IS, Tokio, Japan) erstellt. Beide Kameras verfügten über ein Automatikprogramm, das je nach Lichtverhältnis sowohl die Blendenöffnung und Verschlusszeit, als auch den Blitz und die Brennweite des Objektivs voreinstellte. Neben den Einstellungen der Kamera waren die Verwendung des von Knepper (2017) beschriebenen Stativs und des Fotostandes, sowie den Lampen zur Fotografie vor allem nass-glänzender Thiel-fixierter Präparate notwendig. Zur Bildbearbeitung wurde das Programm ‚Vorschau‘ (Version 8.0) eines MacBook Pro (Ende 2011, Apple Inc., Cupertino, Kalifornien, USA) verwendet.

Des Weiteren wurden alle präparierten Thorax-Schilde schematisch skizziert. Hierzu wurden das Sternum und die Rippenpaare eins bis sieben mit Acrylfarben gemalt und eingescannt. Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3.1 wurden mit dem Programm PowerPoint Bildtafeln der vier makroskopisch präparierten Thorax-Schilde erstellt. Der Verlauf der ITA und ihrer Abgänge wurden hierzu schematisch digital eingefügt und gespeichert (Abb. 38 – 41).

3 Ergebnisse

3.1 Makroskopische Präparation der ITA und ihrer Abgänge

Ziel der makroskopischen Präparation eines Thorax-Schildes war es, genaue Informationen über die Länge und die Anzahl der Abgänge einer ITA zu erhalten. Hierzu wurden vier der fünf Körperspender makroskopisch präpariert (Tab. 5). Von diesen vier makroskopisch präparierten Körperspendern waren zwei Alkohol- und zwei Thiel-fixiert. In den folgenden Beschreibungen wird stets Bezug auf die Einteilung der Spender aus Tabelle 5 genommen.

3.1.1 Länge der ITA

Auf ihrem Weg von der ersten Rippe bis zur Aufteilung in die A. epigastrica superior und A. muscolophrenica betrug die Länge der ITA durchschnittlich 15,56 cm. Dabei variierte die Länge von 12 bis 18 cm. Die rechte ITA war durchschnittlich 15,5 cm lang und die linke 15,6 cm. In drei der vier Fälle waren beide ITAs gleich lang. Lediglich bei Spender-Nr. 1 betrug der Längenunterschied zwischen linker und rechter ITA 0,5 cm (Tabelle 9).

Tab. 9 | Länge jeder ITA und Anzahl der jeweiligen Abgänge

ITA		Spender-Nummer			
		1	2	3	4
Länge in <i>cm</i>	dexter	12	16	16	18
	sinister	12,5	16	16	18
Anzahl Abgänge	dexter	7	19	20	17
	sinister	17	19	20	18

3.1.2 Abgänge der ITA

Im Durchschnitt gab jede ITA 17,1 Abgänge ab. Dabei variierte die Anzahl von sieben bis 20 Abgängen je ITA. Die rechte ITA gab zwischen sieben und 20 Abgängen ab. Die linke ITA hingegen gab im Durchschnitt 18,5 Abgänge ab, wobei minimal 17 und maximal 20 abgegeben wurden. In Abbildung 36 sind die Angaben aus Tabelle 9 graphisch dargestellt.

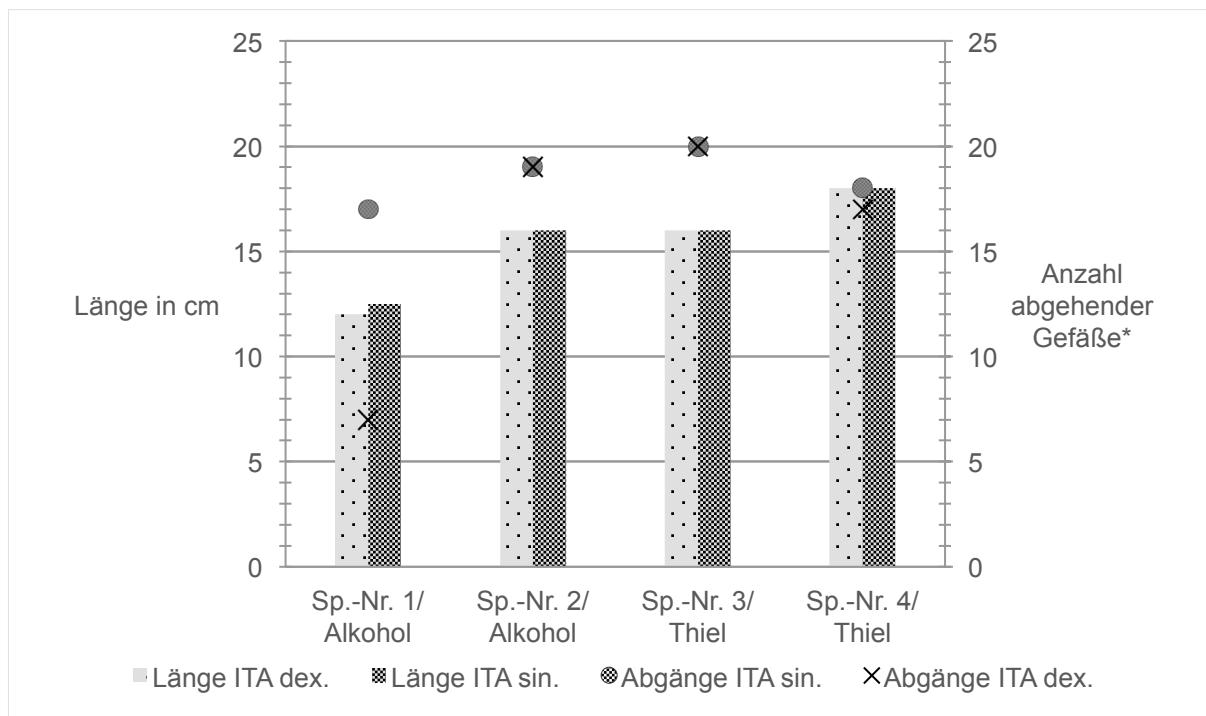


Abb. 36 | Längenangaben der ITAs und die Anzahl ihrer Abgänge je Körperspender. Alkohol= Alkohol-Fixierung, Thiel= Thiel-Fixierung

Im Vergleich konnte ein großer Unterschied zwischen der Anzahl der Abgänge der linken zur rechten ITA im Falle des Spenders Nr. 1 beobachtet werden. Während die linke ITA 17 Abgänge zählte, gab die rechte ITA nur sieben Gefäße an ihre Umgebung ab. Alle anderen ITAs wiesen keine Auffälligkeiten auf.

Die Abgänge der ITA zogen hauptsächlich in zwei Richtungen: nach lateral oder nach medial. Somit wurden Abgänge, die lateralwärts - in Richtung der ICR - verliefen, als Aa. intercostalis anteriores notiert. Nach medial ziehende Abgänge - in Richtung des Sternums und sein umgebendes Weichgewebe – wurden als *sternale Abgänge und Perforatoren* (s. 1.3) zusammengefasst und nicht weiter unterschieden.

In Abbildung 37 sind alle Abgänge je ITA und Richtung aufgeführt.

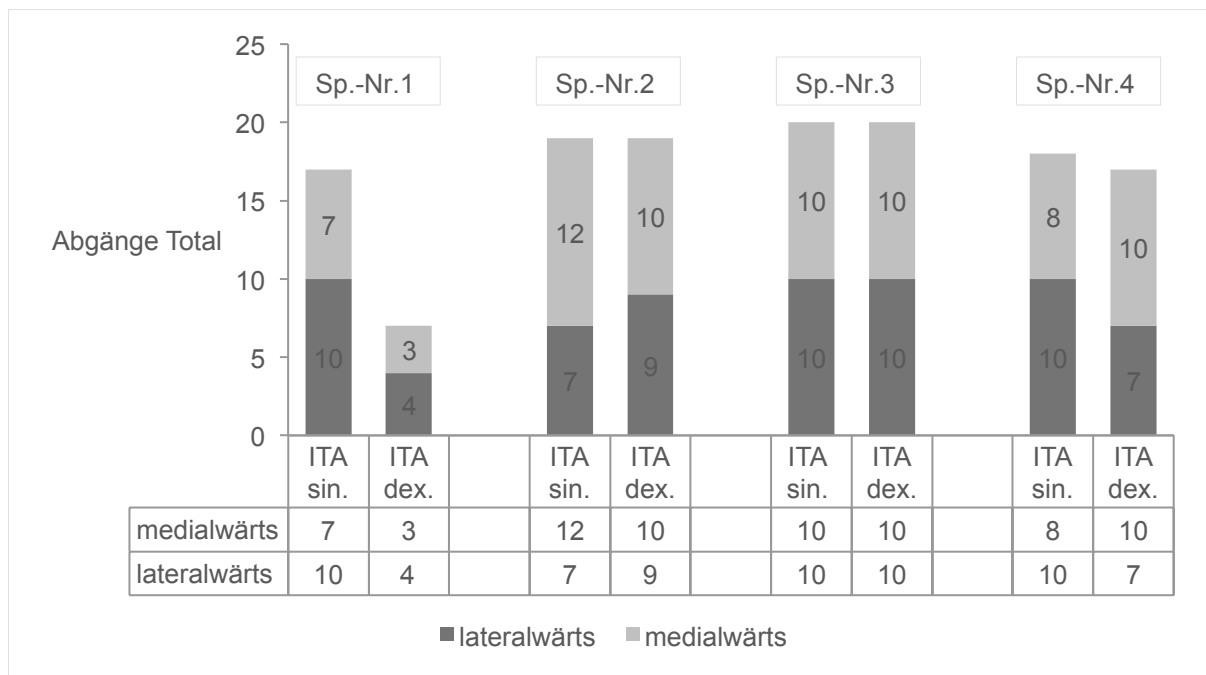


Abb. 37 | Anzahl der abgehenden Gefäße je ITA je Spender. Abgänge lateralwärts = Aa. intercostales anteriores, Abgänge medialwärts = sternale Abgänge und Perforatoren

Nachfolgend sind alle vier Präparationen skizzenhaft veranschaulicht.

Spender-Nr. 1 – Alkohol-fixiertes Thorax-Schild

An diesem Präparat ließen sich 10 Abgänge medial- und 14 Abgänge lateralwärts zählen. Erst im unteren Drittel der rechten ITA sind die wenigen Abgänge der Arterie gefunden worden (Abb. 38).

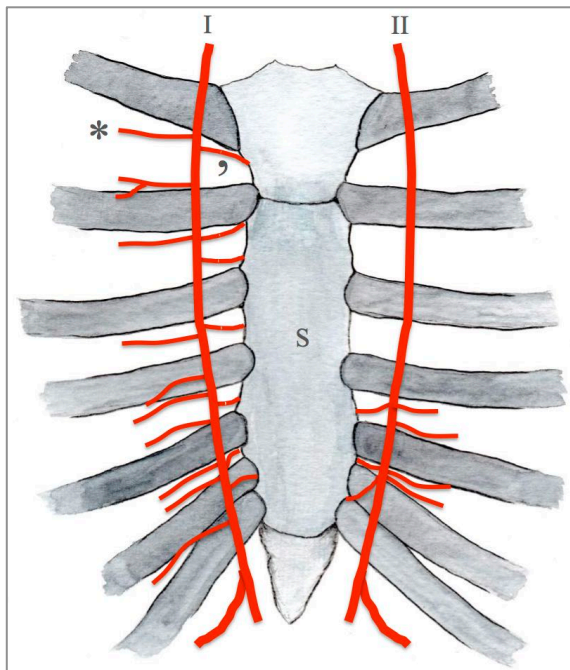


Abb. 38 | Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Spender-Nr.1, Tab. 5) Ansicht von dorsal. S=Sternum, I=linke ITA, II=rechte ITA, (*) Aa. intercostalis anteriores, (,)= sternale Abgänge und Perforatoren

Spender-Nr. 2 – Alkohol-fixiertes Thorax-Schild

Im Fall des Spenders Nr. 2 wurden 22 Abgänge medial - und 16 Abgänge lateralwärts gezählt. Beide ITAs gaben je 19 Abgänge ab (Abb. 39).

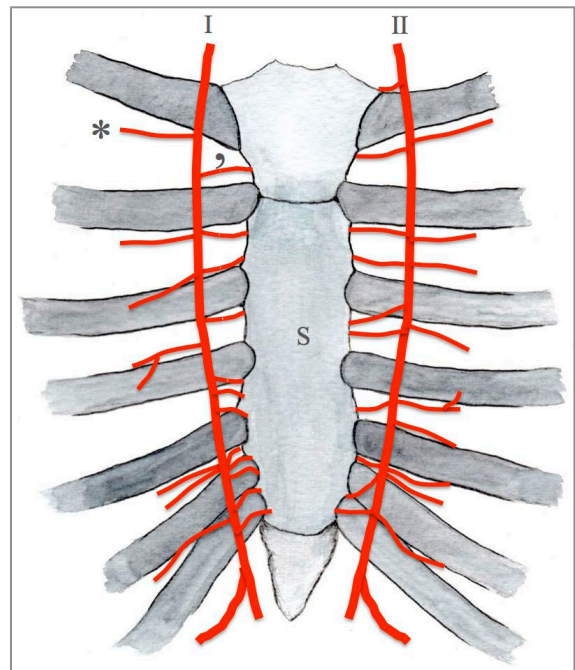


Abb. 39 | Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Spender-Nr.2, Tab. 5) Ansicht von dorsal. S=Sternum, I=linke ITA, II=rechte ITA, (*) Aa. intercostalis anteriores, (,)= sternale Abgänge und Perforatoren

Sponder-Nr. 3 – Thiel-fixiertes Thorax-Schild nach Anwendung der Microfil®-Masse

Insgesamt gaben beide Arterien 20 Abgänge nach medial und 20 Abgänge nach lateral ab (Abb. 40).

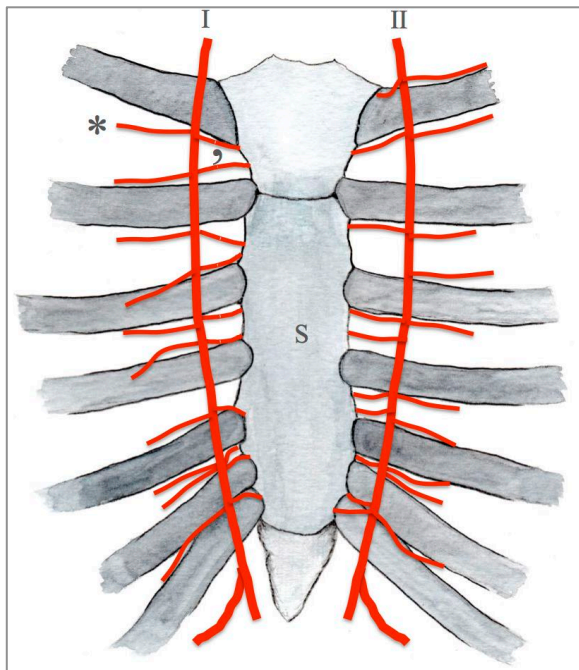


Abb. 40 | Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Sponder-Nr.3, Tab. 5) Ansicht von dorsal. S=Sternum, I=linke ITA, II=rechte ITA, (*) Aa. intercostalis anteriores, (,)= sternale Abgänge und Perforatoren

Sponder-Nr.4 – Thiel-fixiertes Thorax-Schild nach Injektion der Arterienmasse (Thiel 1992)

Beide Arterien gaben insgesamt 35 Abgänge ab, wobei 18 medial und 17 lateral gezählt wurden (Abb. 41).

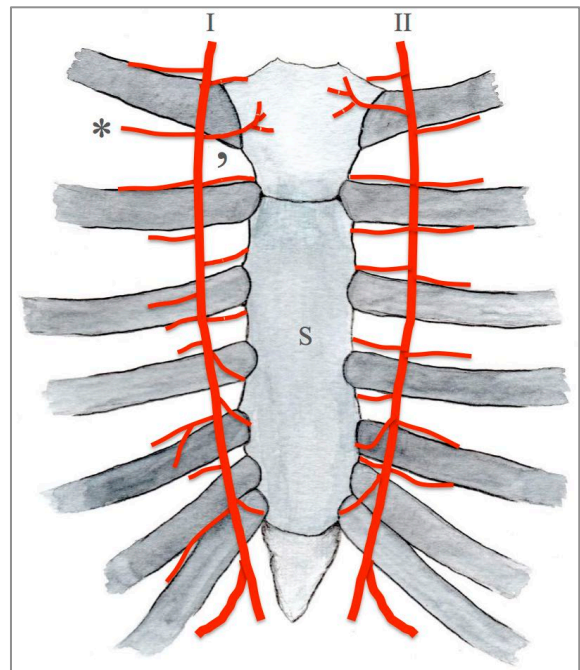


Abb. 41 | Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Sponder-Nr.4, Tab. 5) Ansicht von dorsal. S=Sternum, I=linke ITA, II=rechte ITA, (*) Aa. intercostalis anteriores, (,)= sternale Abgänge und Perforator

3.2 Semi-quantitative Beurteilung der makroskopischen Präparation

Die Alkohol- und Thiel-fixierten Präparate wurden hinsichtlich der Kriterien aus Kapitel 2.7 semi-quantitativ beurteilt und entsprechend des Punkte-Noten-Schlüssels benotet.

3.2.1 Alkohol-fixierte Präparate

Aufgrund der relativ festen Beschaffenheit der Weichgewebe nach Alkohol-Fixierung eigneten sich diese Präparate zur makroskopischen Präparation. Es konnten Strukturen, wie Muskel- und Fettgewebe ohne weiteres stumpf präpariert werden. Jedoch bewirkte die Alkohol-Fixierung eine erhöhte Schrumpfung der Gewebe, wonach vor allem Gefäße kleinen Durchmessers ihre Beweglichkeit und Elastizität verloren (Abb. 42).

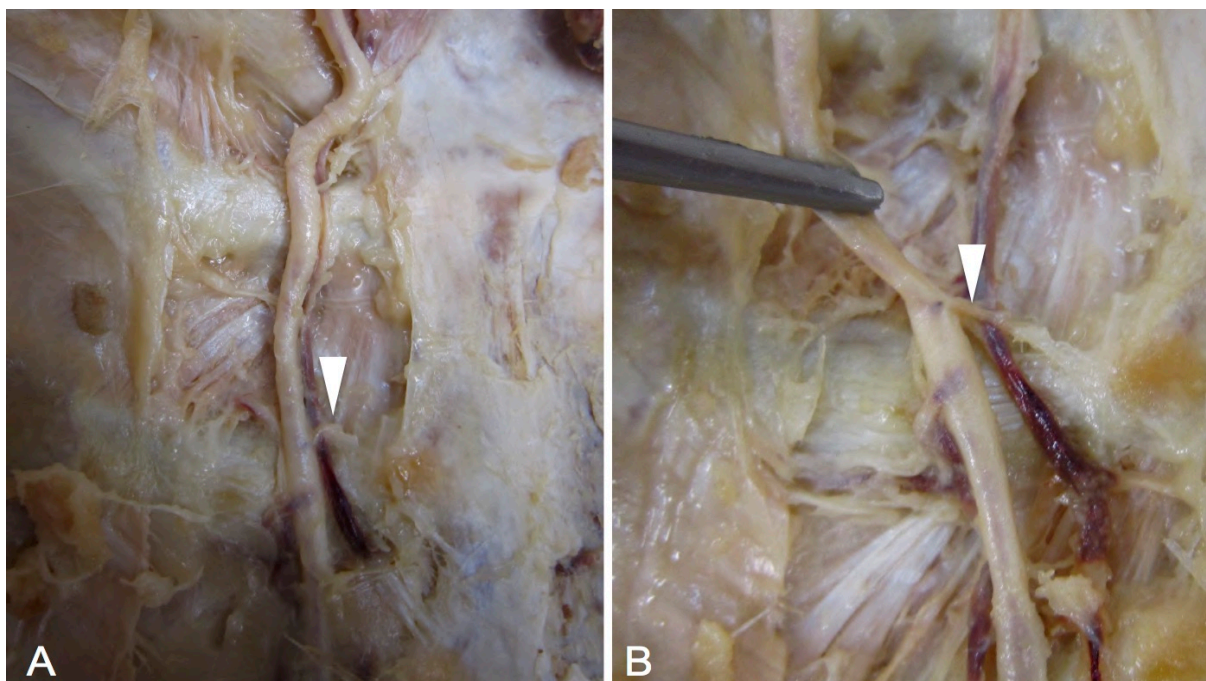


Abb. 42 | Präparation eines Abgangs der ITA am Alkohol-fixierten Thorax-Schild. Im Bild (A) ist ein feiner Abgang (weißer Pfeil) gezeigt, der in Richtung des Sternums zieht. Aufgrund seines geringen Farbkontrastes zum umliegenden Gewebe und kleinen Durchmessers ist dieser Abgang kaum zu erkennen. Nach Zug am Gefäß ist er jedoch erkennbar (B).

Zum Teil konnten die feinen Abgänge nicht präpariert werden, ohne sie zu verletzen oder abzureißen (Abb. 43).

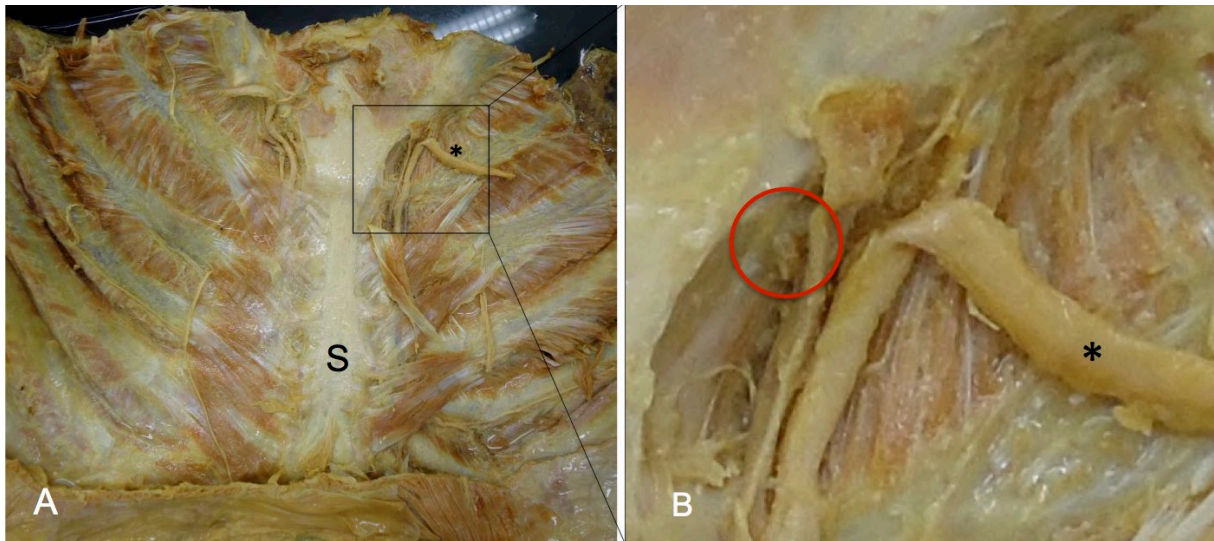


Abb. 43 | Perforation eines Abgangs der ITA. Nach Anheben des Thorax-Schildes eines Alkohol-fixierten Spenders ist die rechte ITA im Bild (A) gut zu erkennen; im Bild (B) ist der Ausschnitt aus (A) vergrößert dargestellt: vor allem Abgänge kleinen Durchmessers lassen sich nur schwer auffinden und präparieren, ohne sie zu verletzen. Der im roten Kreis liegende Bereich zeigt die Abrissstelle eines sternalen Abgangs von der ITA; * = A. thoracica interna, S = Sternum

Insgesamt bewirkte die Fixierung mit Alkohol einen Verlust der natürlichen Gewebefarbe. Vor allem während der Präparation erschwerte der geringe Farbkontrast die Suche und das sichere Auffinden feiner Abgänge der ITA (Abb. 42).

Unter Tabelle 10 ist die Bewertung der makroskopischen Präparation Alkohol-fixierter Präparate gezeigt. Mit einer Gesamtpunktzahl von 19 (63,33 % der max. Punktzahl) wurde diese Methode mit der Note 3 bewertet.

Tab. 10 | Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation Alkohol-fixierter Thorax-Schilder

Beurteilungskriterien Für die makroskopische Präparation am Alkohol- fixierten Präparat	Bewertung					Punktzahl 1-5
	- -	-	0	+	++	
Präparierfähigkeit der Weichgewebe					x	5
Flexibilität der Weichgewebe			x			3
Farbkontrast der Weichgewebe zueinander			x			3
Präparierfähigkeit der ITA und ihrer Abgänge				x		4
Flexibilität der ITA und ihrer Abgänge		x				2
Farbkontrast der ITA und ihrer Abgänge zum umliegenden Gewebe		x				2
Gesamtpunktzahl Note						= 19 = 3

3.2.2 Thiel-fixierte Präparate

3.2.2.1 Thorax-Schild ohne Injektionstechnik

Die Anwendung der Thiel-Fixierung ermöglichte zwar im Vergleich zur Alkohol-Fixierung einen höheren Farbkontrast der Gewebe zueinander, jedoch blieben die Gefäße sehr weich und nahezu transparent. Gerade bei der Präparation sehr feiner Abgänge der ITA, stellten diese Umstände eine Herausforderung dar (Abb. 44).

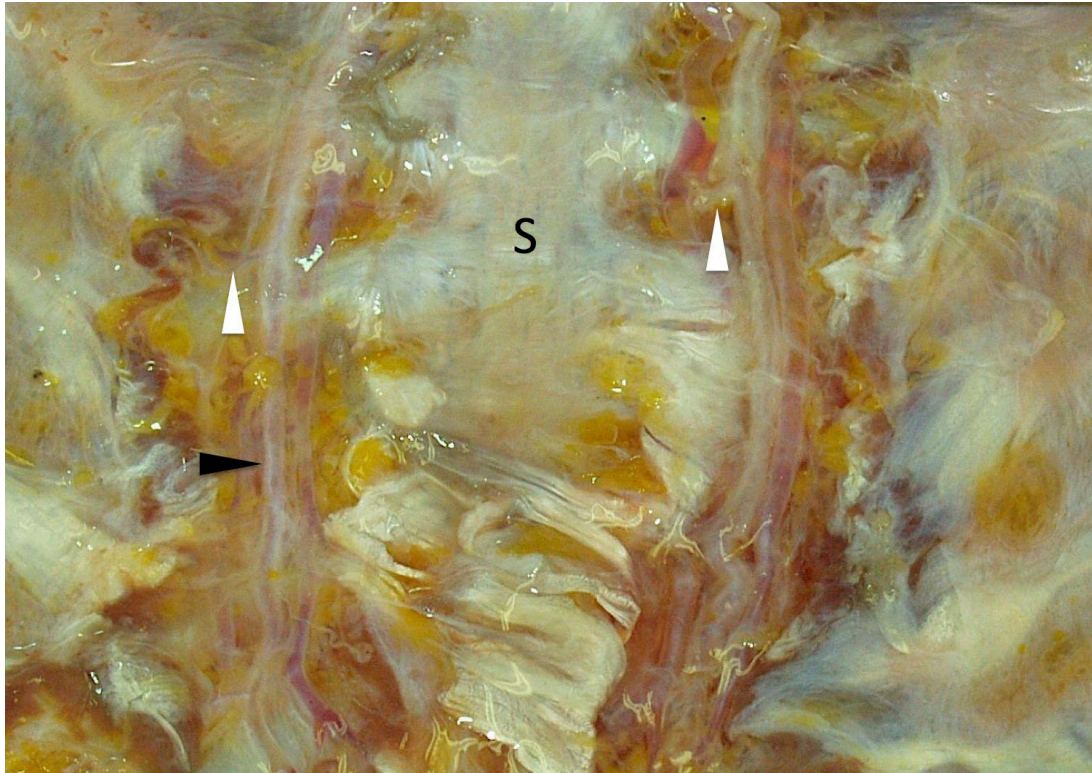


Abb. 44 | Thiel-fixiertes Thorax-Schild vor Anwendung der Microfil®-Technik. Die sehr feinen Abgänge (weiße Pfeile) der ITA (schwarzer Pfeil) sind aufgrund ihrer hohen Transparenz kaum vom umliegenden Gewebe zu unterscheiden. S = Sternum

Die tlw. sehr feinen Abgänge ließen sich wegen des nass-glänzenden Präparats und des geringen Farbkontrastes zum umliegenden Gewebe kaum auffinden. Wiederum bestand eine hohe Widerstandsfähigkeit der Gewebe nach Thiel-Fixierung. Insbesondere Gefäße zeigten eine hohe Zugfestigkeit, wodurch die Gefahr des versehentlichen Abreißens kleiner Abgänge vom Stammgefäß wesentlich geringer war. In Tabelle 11 ist die Bewertung der makroskopischen Präparation Thiel-fixierter Thorax-Schilder gezeigt. Es ergab sich eine Gesamtpunktzahl von 21. Das entspricht 70% der max. Punktzahl (Note 3).

Tab. 11 | Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes (ohne Injektionstechnik)

Beurteilungskriterien für die makroskopische Präparation am Thiel- fixierten Präparat (ohne Injektionstechnik)	Bewertung					Punktzahl 1-5
	- -	-	0	+	++	
Präparierfähigkeit der Weichgewebe			x			3
Flexibilität der Weichgewebe					x	5
Farbkontrast der Weichgewebe zueinander				x		4
Präparierfähigkeit der ITA und ihrer Abgänge		x				2
Flexibilität der ITA und ihrer Abgänge					x	5
Kontrast der ITA und ihrer Abgänge zum umliegenden Gewebe		x				2
Gesamtpunktzahl Note						= 21 = 3

3.2.2.2 Thorax-Schild mit Injektionstechnik - Microfil®-Masse

Die Vorteile des Microfil®-Gemisches bestanden in der kontrastreichen roten Farbe und der Festigkeit der Masse nach dem Aushärten. Auf diese Weise konnten Abgänge der ITA mit geringem Durchmesser gefüllt und durch den Kontrast zum umliegenden Gewebe dargestellt werden (Abb. 45).

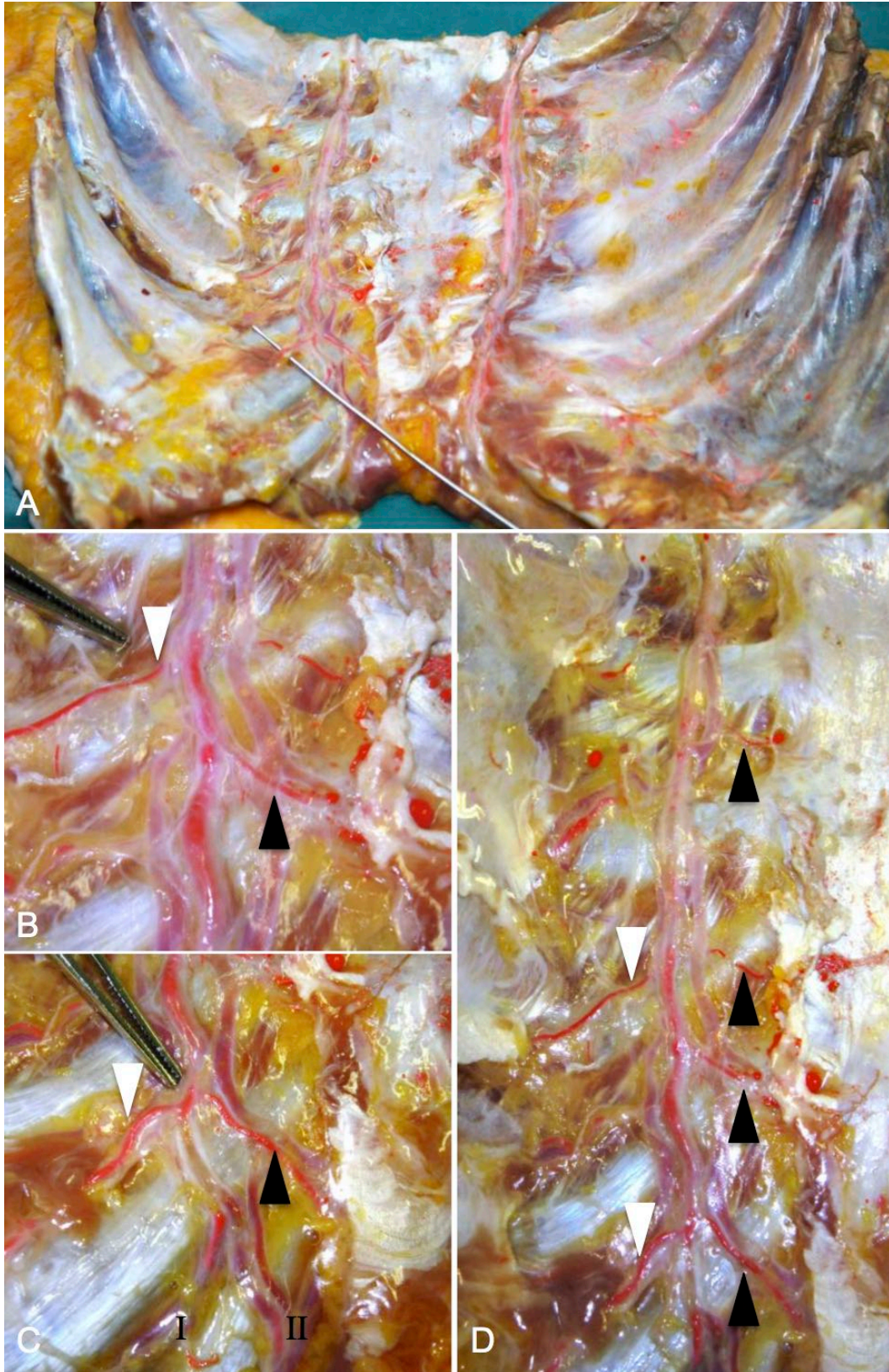


Abb. 45 | Präparierte ITA und Abgänge nach Anwendung der Microfil®-Technik eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes. Bild (A) = Übersichtsaufnahme. Bild (B) zeigt einen sternalen Abgang (schwarzer Pfeil) und eine A. intercostalis ant. (weißer Pfeil). Im Bild (C) sind Abgänge gezeigt, bevor sich die ITA in die (I) A. musculophrenica und (II) A. epigastrica sup. aufteilt. (D) = linke ITA

In der Übersichtsaufnahme (Abb. 45 A) ist der Farbkontrast der Microfil®-Masse zum Gewebe bereits gut zu erkennen und hebt den Verlauf beider Arterien hervor. Bei genauerem Hinsehen ist jedoch die tlw. inhomogene Füllung der ITA mit der roten Masse zu erkennen (Abb. 45 B), die unter Abbildung 46 noch einmal hervorgehoben ist.

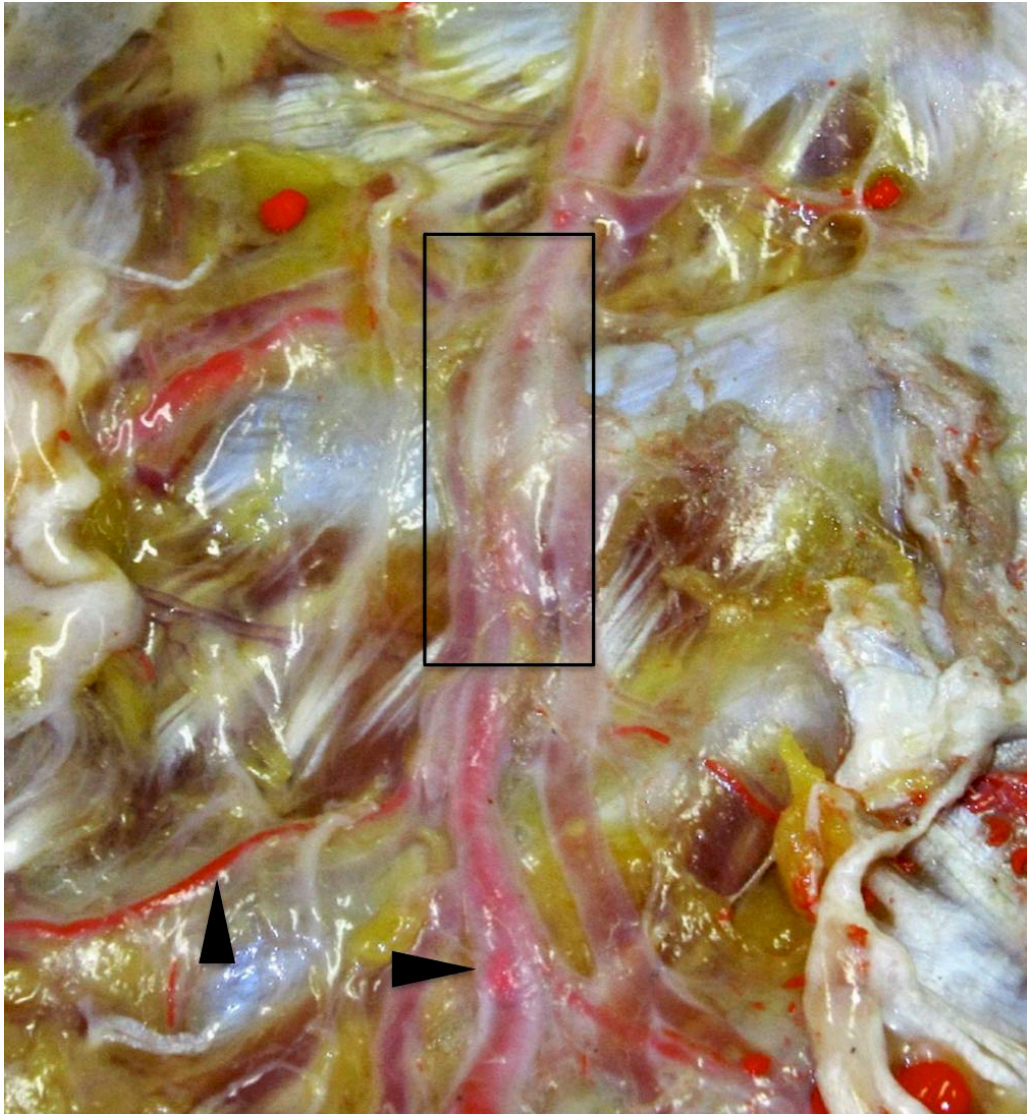


Abb. 46 | Präparierte ITA und Abgänge nach Anwendung der Microfil®-Technik eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes. Der umrahmte Bereich zeigt einen ungefüllten Abschnitt der linken ITA. Unterhalb des hervorgehobenen Bereiches sind wiederum gut gefüllte Abschnitte der ITA zu erkennen (schwarze Pfeile).

Das elastische Verhalten der ausgehärteten Microfil®-Masse verhalf zur Verbesserung der Präparation der ITA und Abgänge, wobei nicht alle Abschnitte des Gefäßsystems gleichermaßen gefüllt werden konnten. Im Vergleich der Präparation

am Thiel-fixierten Präparat ohne Injektionstechnik konnte die Präparierfähigkeit nach Anwendung der Microfil®-Masse tlw. verbessert werden.

Unter Tabelle 12 ist die Bewertung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Anwendung der Microfil®-Injektionstechnik aufgeführt. Hier ergab die Bewertung dieser Methode eine Punktzahl von 24. Das entspricht 80% der max. Punktzahl, also der Note 2.

Tab. 12 | Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Microfil®-Injektion

Beurteilungskriterien für die makroskopische Präparation am Thiel- fixierten Präparat (nach Microfil®-Injektion)	Bewertung					Punktzahl 1-5
	- -	-	0	+	++	
Präparierfähigkeit der Weichgewebe			x			3
Flexibilität der Weichgewebe					x	5
Farbkontrast der Weichgewebe zueinander				x		4
Präparierfähigkeit der ITA und ihrer Abgänge			x			3
Flexibilität der ITA und ihrer Abgänge					x	5
Kontrast der ITA und ihrer Abgänge zum umliegenden Gewebe				x		4
Gesamtpunktzahl Note						= 24 = 2

3.2.2.3 Thorax-Schild mit Injektionstechnik – Arterienmasse nach Thiel

Die eigens für die Thiel-Fixierung hergestellte Arterienmasse Thiels (1992) zeigte nach der Polymerisation eine hohe Festigkeit bei gleichzeitiger Elastizität, welche die Präparation der ITA und ihrer Abgänge wesentlich vereinfachte. So konnten die ITAs und ihre Abgänge gut gegriffen und das umliegende Gewebe abpräpariert werden. Des Weiteren ermöglichte der hohe Farbkontrast der Masse das Auffinden kleiner Abgänge (Abb. 47). Zum Teil gelang es sternale Abgänge bis zu ihrem Eintritt in das Sternum zu verfolgen und zu präparieren (Abb. 47 B).

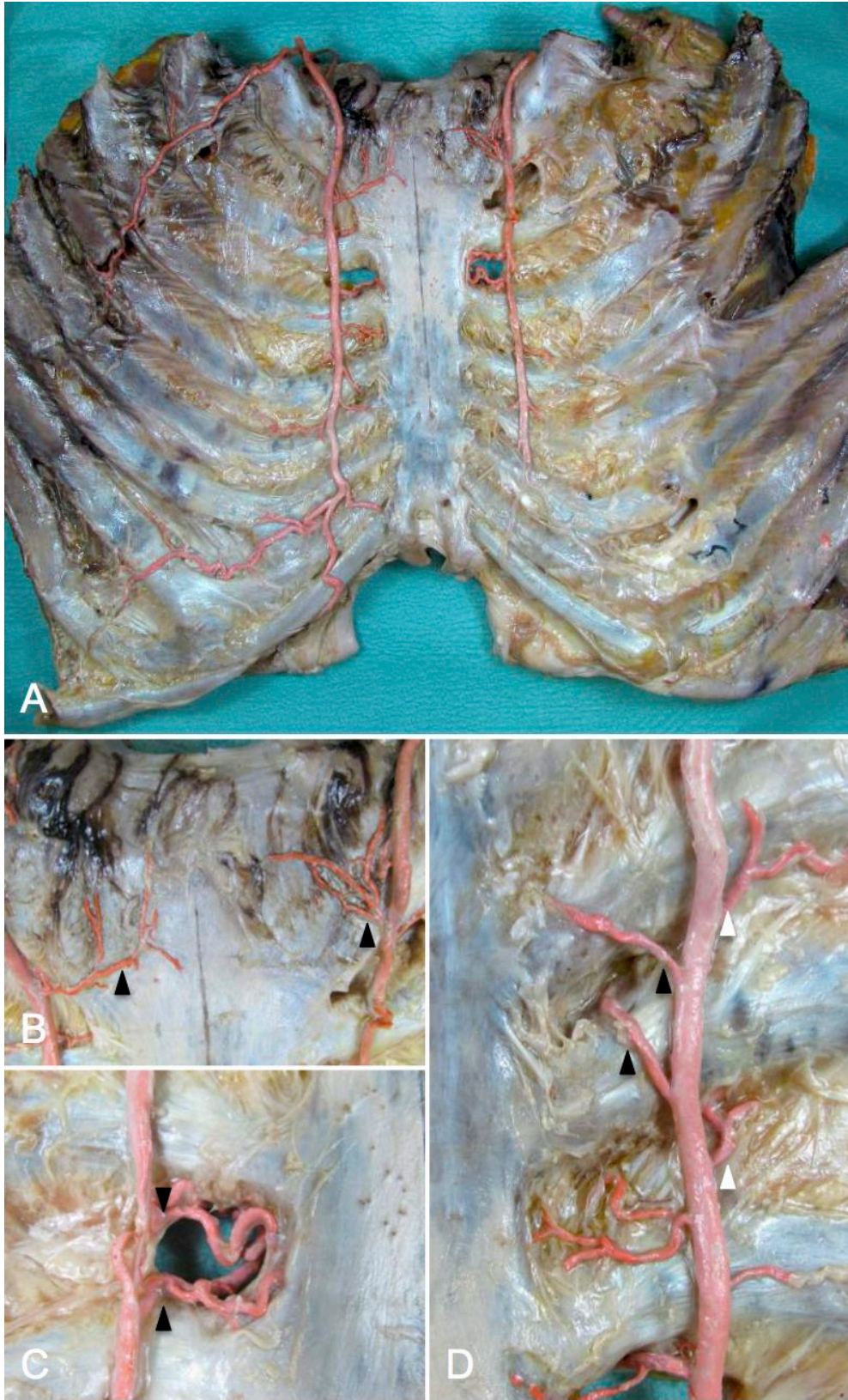


Abb. 47 | Präparierte ITA eines Thiel-fixierten Körperspenders nach Injektion der Arterienmasse Thiels (1992). Im Bild (A) ist eine Übersichtsaufnahme des Thorax-Schildes gezeigt. Die im Bild (B) mit schwarzen Pfeilen markierten sternalen Abgänge können bis zum Eintritt in den Knochen verfolgt werden. Im Bild (C) sind weitere sternalen Abgänge der ITA gezeigt. Aa. intercostales anteriores sind mit weißen Pfeilen im Bild (D) dargestellt.

Gerade die rote Farbe der Masse und die deutliche Füllung der Gefäße lassen den Verlauf beider ITAs bereits in der Übersicht erkennen (Abb. 47 A). Aber auch die Reichweite der Masse konnte durch den Kontrast gut beurteilt werden. Wie in Abbildung 48 zu erkennen ist, blieb das untere Drittel der ITA ungefüllt. Im Seitenvergleich wird noch einmal deutlich, wie fein, transparent und weich die Gefäße nach Thiel-Fixierung erscheinen.

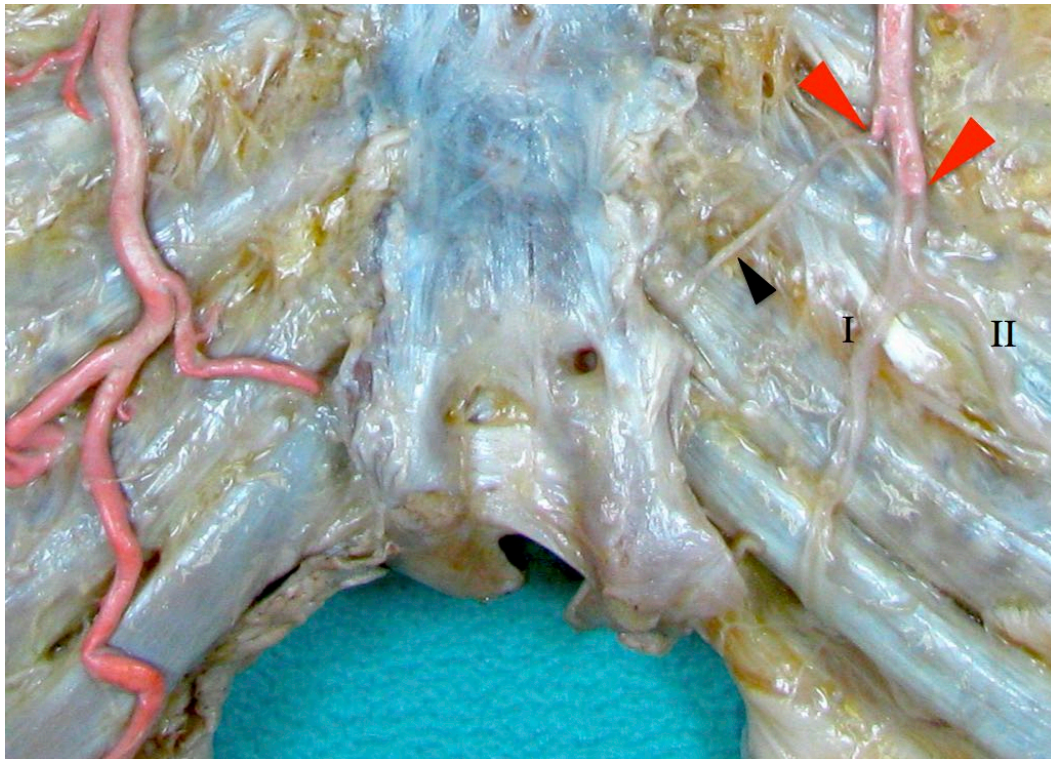


Abb. 48 | Präparation der ITA und ihrer Abgänge nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992) an einem Thiel-fixierten Körperspender. Im Bild ist die Reichweite der Masse innerhalb der rechten ITA durch den Farbkontrast gut zu erkennen (rote Pfeile). Der feine Abgang (schwarzer Pfeil) erscheint ungefüllt sehr grazil, weich und nahezu transparent.

Insgesamt wurde diese Methode zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge mit einer Punktzahl von 27 bewertet. Dies entspricht 90% der max. Punktzahl und damit der Note 1 (Tabelle 13).

Tab. 13 | Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Arterienmasse-Injektion (Thiel 1992)

Beurteilungskriterien für die makroskopische Präparation am Thiel- fixierten Präparat (nach Arterienmasse-Injektion)	Bewertung					Punktzahl 1-5
	- -	-	0	+	++	
Präparierfähigkeit der Weichgewebe			x			3
Flexibilität der Weichgewebe					x	5
Farbkontrast der Weichgewebe zueinander				x		4
Präparierfähigkeit der ITA und ihrer Abgänge					x	5
Flexibilität der ITA und ihrer Abgänge					x	5
Kontrast der ITA und ihrer Abgänge zum umliegenden Gewebe					x	5
Gesamtpunktzahl Note						= 27 = 1

3.3 Semi-quantitative Beurteilung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mit Mimics®

Die segmentierungsbasierten Rekonstruktionen zweier Thorax-CTs wurden hinsichtlich der Kriterien aus Kapitel 2.7 semi-quantitativ beurteilt und entsprechend des Punkte-Noten-Schlüssels benotet.

3.3.1 Kontrastmittel-CT

Die Installation des Infusionssystems war aufgrund der vorpräparierten A. und V. femoralis einfach möglich. Das Kontrastmittel konnte unter Berücksichtigung der Angaben des Herstellers unkompliziert hergestellt werden und die Kompatibilität des Infusionssystems mit der Pumpe ermöglichte eine einfache und druckkontrollierte Injektion während der Untersuchung (s. 2.6.1). Demzufolge waren Handhabung und Applikation der nichterstarrenden Kontrastmittel-Lösung einfach und reproduzierbar.

Die Segmentierung erfolgte wie unter Punkt 2.6 beschrieben. Die Übersicht des Thorax vor Beginn der Segmentierung ist unter Abbildung 49 gezeigt.

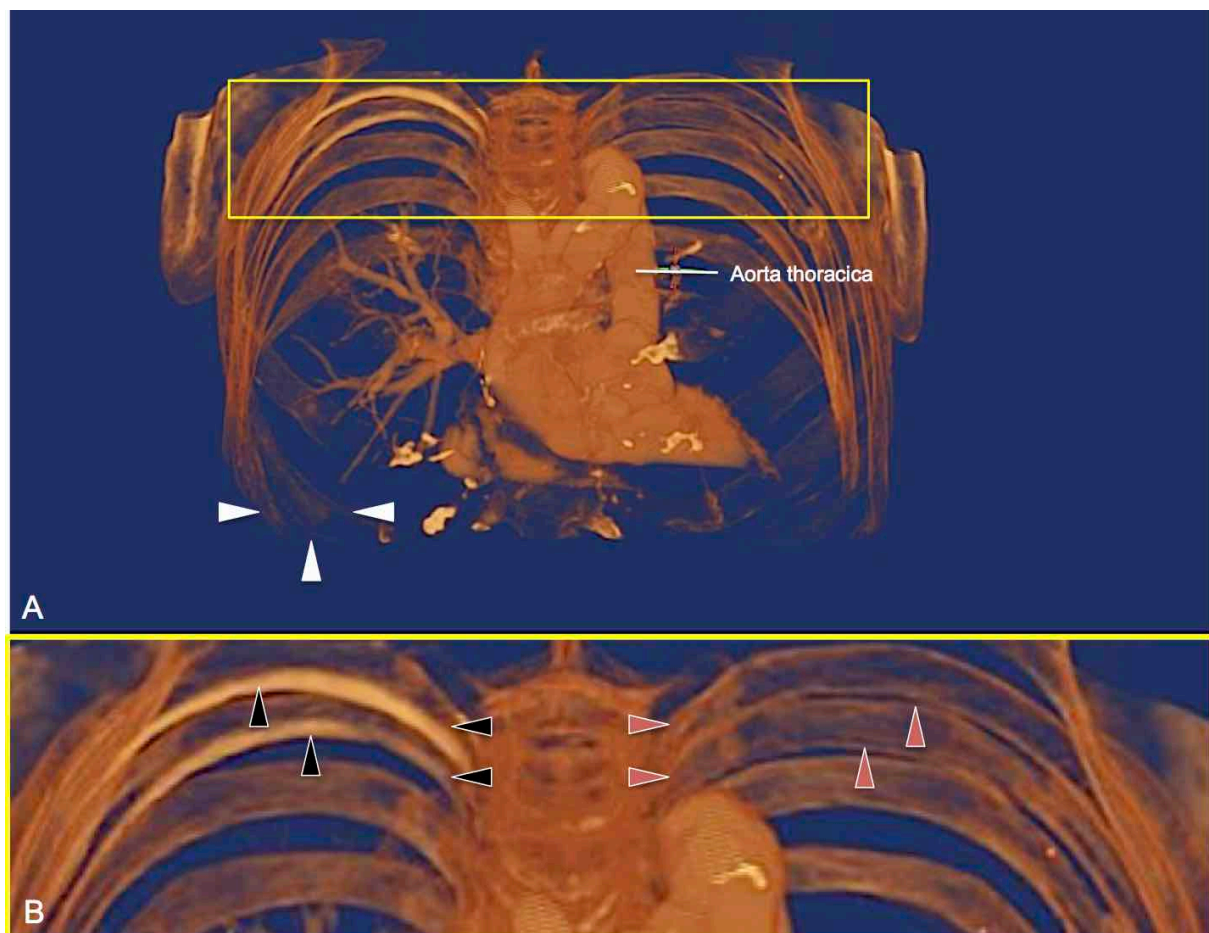


Abb. 49 | Übersichtsaufnahme des zu segmentierenden Thorax einer Thiel-fixierten Körperspenderin nach Kontrastmittel-CT. Bild (A) zeigt die Übersichtsgrafik. Es ist zu beachten, dass die Rippen nach ventral verblassen und undeutlich erscheinen (weiße Pfeile). Bild (B) zeigt den gelb umrahmten Ausschnitt aus (A) vergrößert. Im Seitenvergleich erscheinen die rechten Rippen an ihrer Unterseite deutlich heller, was auf den Verlauf der Aa. intercostales posteriores hindeutet (schwarze Pfeile). Links hingegen ist dieser Kontrast nicht erkennbar (rote Pfeile).

Bereits in der Übersichtsaufnahme ist ein Unterschied der Dichte des knöchernen Thorax nach ventral zu erkennen. Die Rippen erscheinen ventral deutlich transparenter als dorsal. Dagegen erscheinen die Wirbelsäule und die Aorta thoracica wesentlich dichter und damit kontrastreicher, was für die Unterscheidung der Gewebe während der Segmentierung nötig war. Andeutungsweise sind die mit dem Kontrastmittel gefüllten Aa. intercostales posteriores der rechten Seite im Bild zu erkennen, wobei der Kontrast im Seitenvergleich fehlt (Abb. 49 B).

Die verschiedenen Kontraste der Strukturen aus Abbildung 50 werden durch die Grauwerte der Pixel bestimmt. Wie unter Punkt 1.6.4 beschrieben, korrelieren die Grauwerte (HU-Werte) der Pixel mit der Dichte der Gewebe. Um diesen Zusammenhang besser zu beschreiben und Aussagen über die Qualität der segmentierungsbasierten Rekonstruktion des Thorax und der Gefäße zu formulieren, wurden die HU-Werte von Weichgewebe, Knochengewebe und Kontrastmittel (KM) zweier CT-Schnittbilder gemessen (Abb. 50).

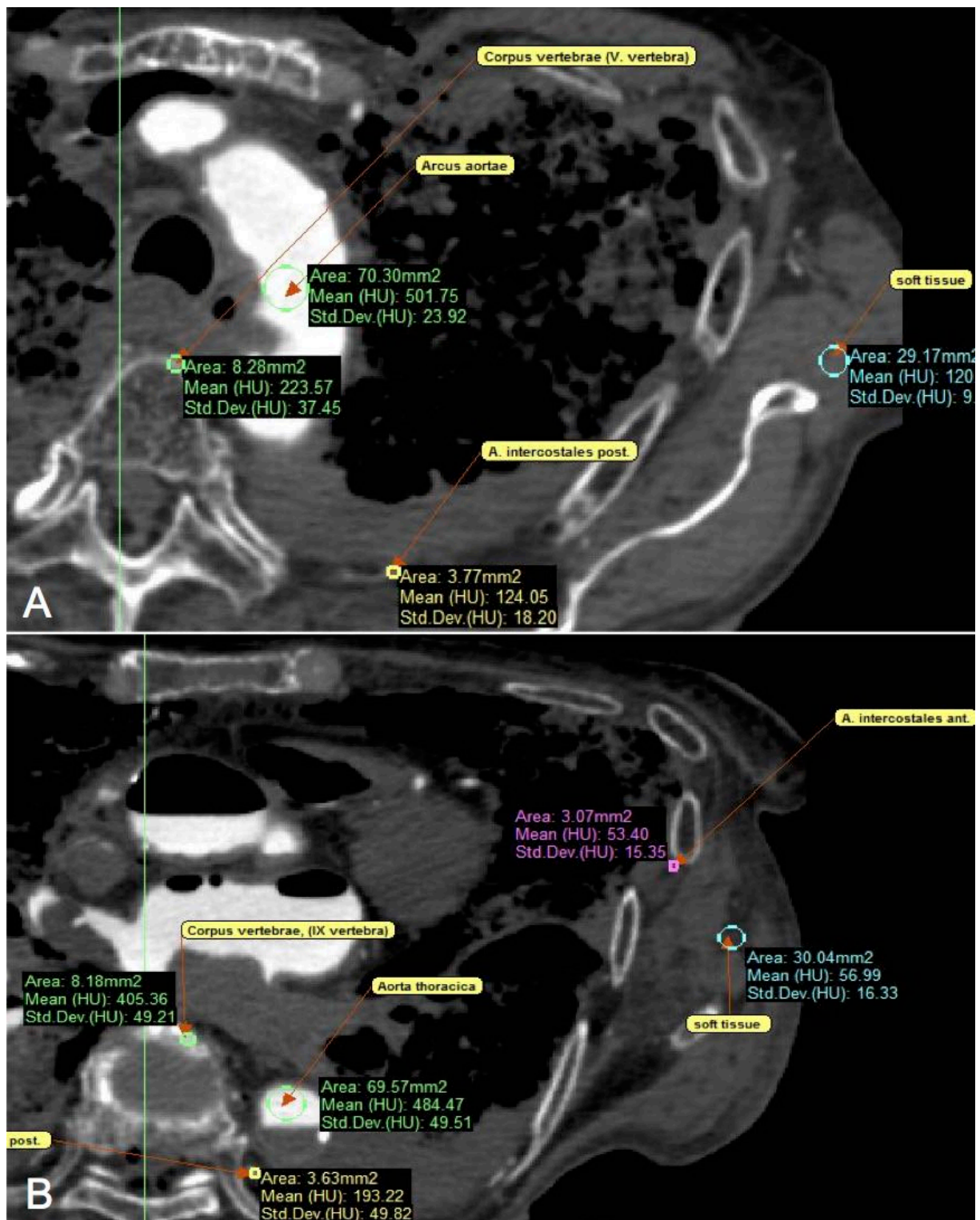


Abb. 50 | Dichtemessungen von Kontrastmittel (KM), Knochen- und Weichgewebe der Thorax-CT einer Thiel-fixierten Körperspende. Im Bild (A) sind die Dichtemessungen von I=Corpus vertebra, II=Aorta, III=A. intercostalis posteriores und IV=Weichgewebe auf Höhe des 5. Brustwirbels in Hounsfield Units (HU) gezeigt. Zum Vergleich sind im Bild (B) die Messungen der Dichte von I,II,III und IV. auf Höhe des 10. Brustwirbels dargestellt.

Die gemessenen HU-Werte aus Abbildung 50 sind unter Tabelle 14 aufgeführt.

Tab. 14 | HU-Werte von Knochengewebe, Weichgewebe und Kontrastmittel der Thorax-CT einer Thiel-fixierten Körperspenderin

Struktur	HU-Wert	
	Höhe 5. Brustwirbel (Abb. 49 A)	Höhe 10. Brustwirbel (Abb. 49 B)
I Knochengewebe (Corpus vertebra)	223,57	405,63
II KM Aorta thoracica	501,75	484,47
III KM A. intercostalis posteriores	124,05	53,40
IV Weichgewebe	120,26	56,99

HU=Hounsfield Unit, KM=Kontrastmittel

Die Werte für Weichgewebe lagen im Bereich von 57 HU – 120 HU. Gleichfalls ergaben die Messungen für KM in der A. intercostalis posteriores 53 HU und 124 HU. Somit überschneiden sich die Grauwerte und demzufolge die Dichte beider Strukturen in der CT-Aufnahme (Abb. 51 A). Das auf dieser Auswahl basierende 3D-Modell des Thorax zeigte deutlich, dass die Segmentierung der Aa. intercostales posteriores vom umliegenden Weichgewebe mittels „Thresholding“ unmöglich war (Abb. 51 B).

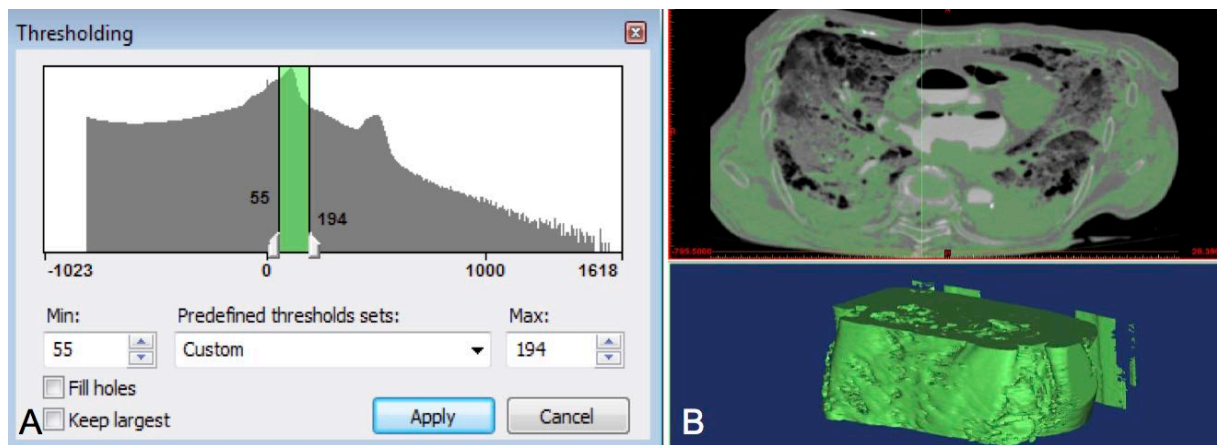


Abb. 51 | Segmentierungsversuch der A. intercostalis posteriores nach KM-CT. Bild (A) zeigt die Verwendung des Werkzeugs „Thresholding“. Dabei wird der Grenzbereich der HU-Werte individuell festgelegt („Custom“). Alle Pixel, deren Graustufen im Bereich von 55 HU und 200 HU (Knochengewebe, KM der A. intercostalis post.) liegen, sind grün markiert (B oben). Die Berechnung des 3D-Modells, basierend auf dieser Auswahl, ist im Bild (B) unten gezeigt.

Die Aa. intercostales posteriores konnten nur manuell mit dem Werkzeug „Multiple Slice Edit“ Bild für Bild vom umgebenden Knochen- und Weichgewebe separiert werden (s. 2.6). Der relativ niedrige Röntgenkontrast des KMs in den Aa. intercostales posteriores ließ die Gefäße nur andeutungsweise im Bild erkennen und erschwerte die Segmentierung, die so mehrere Tage in Anspruch nahm. In Abbildung 52 ist das rekonstruierte Modell des Thorax dargestellt.

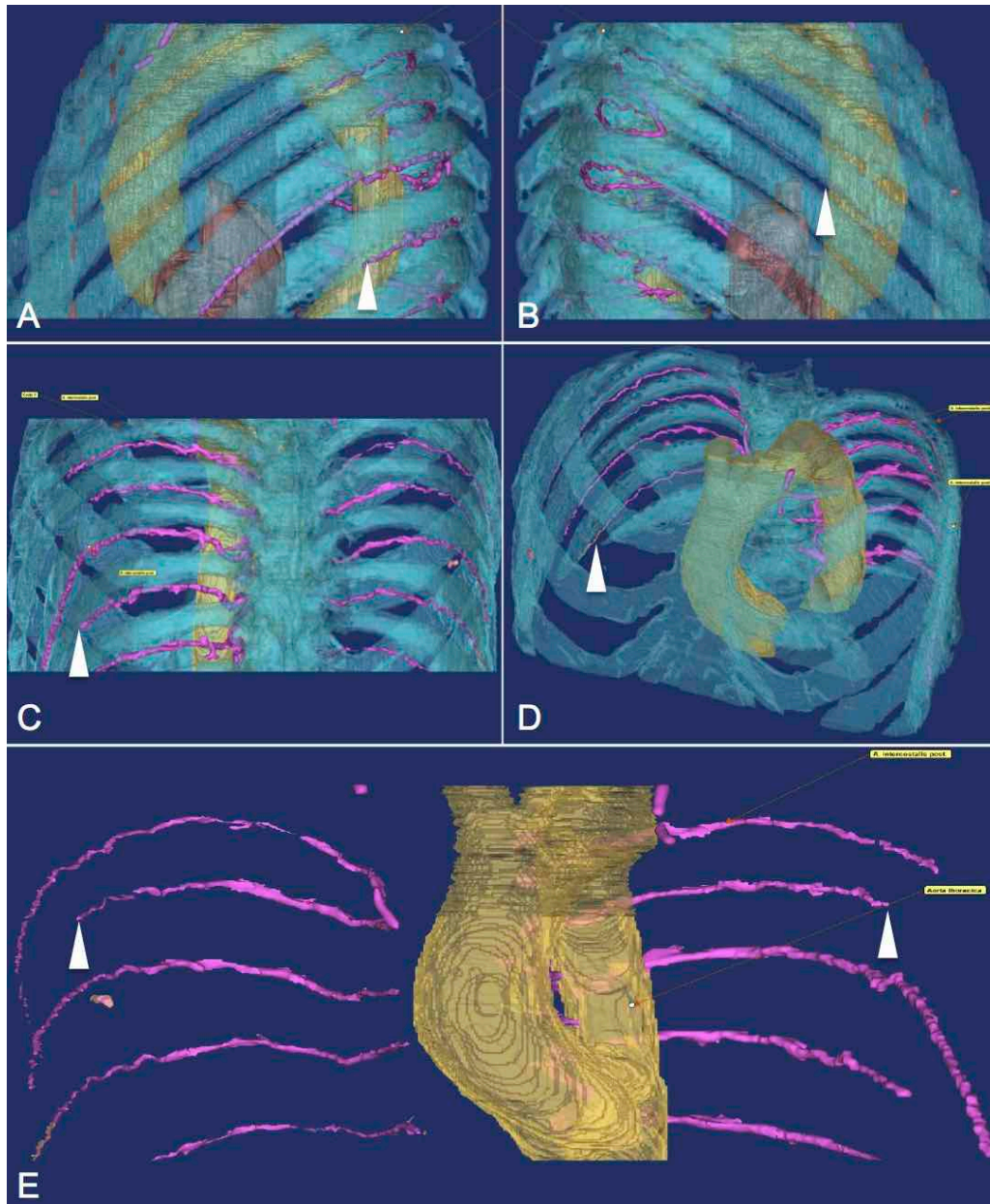


Abb. 52 | Segmentierung des knöchernen Thorax, der Aorta und der Aa. intercostales posteriores der KM-CT einer 83-jährigen Thiel-fixierten Spenderin. violett = Aa. intercostales posteriores; türkis = Knöcherner Thorax; gelb = Aorta; rot = Teile des Herzens; (A) Ansicht von links, (B) von rechts, (C) von dorsal und (D) von ventrokranal. (E) zeigt die Aa. intercostales ohne knöchernen Thorax von ventral. Zu beachten sind die plötzlichen Enden der segmentierten Aa. intercostales posteriores (weiße Pfeile)

Die Reichweite der KM-Lösung ist anhand des Beispiels in Abbildung 52 E gezeigt. Die Segmentierung der Aa. intercostales posteriores konnte nicht beendet bzw. die Gefäße nicht vollständig dargestellt werden. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die KM-Lösung nicht alle Abschnitte der Gefäße gleichermaßen erreichte und die Reichweite zur Darstellung des Gefäßsystems nicht ausreichte.

Ein großer Vorteil der Injektion des KMs liegt in der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit des Versuches auch am selben Präparat, da die Lösung nicht aushärtet und das Gefäßsystem frei bleibt. Der Körperspender blieb nach Injektion des KMs unverändert und konnte auch für weitere Kurse am anatomischen Institut verwendet werden.

Unter Tabelle 15 ist die Bewertung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mittels Mimics® der Thorax-CT nach Kontrastmittel-Injektion gezeigt. Diese Methode wurde mit der Note 3 bewertet (21 Pkt.)

Tab. 15 | Beurteilung und Benotung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion einer Thorax-CT nach Kontrastmittelinjektion am Thiel-fixierten Präparat

Beurteilungskriterien für die segmentierungsbasierte Rekonstruktion nach Kontrastmittel-Injektion	Bewertung					Punktzahl 1-5
	- -	-	0	+	++	
Handhabung/Applikation der Injektionsmasse					x	5
Röntgenkontrast der Injektionsmasse			x			3
Reichweite der Injektionsmasse im Gefäßsystem			x			3
Dauer der Segmentierung am PC		x				2
Qualität der segmentierungsbasierten Rekonstruktion			x			3
Wiederverwendbarkeit des Spenders nach Injektion					x	5
Gesamtpunktzahl Note						= 21 = 3

3.3.2 Arterienmasse nach Thiel (1992)

Wie bei der Kontrastmittelinjektion ermöglichte die Durchgängigkeit der Gefäße nach Thiel-Fixierung die Injektion der erstarrenden Arterienmasse Thiels. Die Herstellung der Masse, die Installation des Gefäßsystems am Präparat und am Irregator waren im Vergleich zur KM-Injektion aufwendig und nur unter Berücksichtigung gewisser Vorsichtsmaßnahmen, wie der Verwendung eines Mundschutzes während der Herstellung der Masse, möglich (s. 2.5.2). Die Injektion der Masse und die anschließende CT-Untersuchung mussten an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt werden, da die Masse mind. sieben Tage aushärtete. Handhabung und Applikation der Masse waren demzufolge erschwert und der Versuch in seiner Durchführung aufwendig.

Die segmentierungsbasierte Rekonstruktion dieses CT-Datensatzes wurde gemäß Punkt 2.6 durchgeführt. Die Abbildung 53 zeigt das 3D-Übersichtsmodell vor Beginn der Segmentierung mittels Mimics®. Die mit der Masse gefüllten Arterien weisen generell eine wesentlich höhere Helligkeit gegenüber Knochen- und Weichgewebe auf. So lässt sich schon in der Übersichtsaufnahme der Verlauf der ITA erkennen.



Abb. 53 | 3D-Übersichtsmodell des Thorax einer 83-jährigen Thiel-fixierten Spenderin nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992). Die ITA (*) ist beidseits deutlich zu erkennen.

Die Messung der HU-Werte von Arterienmasse, Knochengewebe und Weichgewebe zur Segmentierung erfolgte wie unter Punkt 2.6 beschrieben. Auch hier eignete es sich die Messung der Dichte an zwei Beispielbilder der CT durchzuführen (Abb. 54).



Abb. 54 | Dichtemessungen von Arterienmasse, Knochen- und Weichgewebe der CT einer 83-jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992). Bild (A) zeigt die Messung auf Höhe des 5. Brustwirbels, und Bild (B) auf Höhe des 10. Brustwirbels. I = Weichgewebe, II = ITA mit Arterienmasse, III = Sternum, IV = Aorta mit Arterienmasse

Alle gemessenen Werte aus Abbildung 54 sind in Tabelle 16 angeführt.

Tab. 16 | HU-Werte von Knochengewebe, Weichgewebe und der Arterienmasse der Thorax-CT einer Thiel-fixierten Körperspenderin

Struktur	HU-Wert	
	Höhe 5. Brustwirbel (Abb. 53 A)	Höhe 10. Brustwirbel (Abb. 53 B)
I Weichgewebe im Bereich des Sternums	160,33	152,88
II Arterienmasse in ITA	858,90	665,80
III Sternum	249,35	292,35
IV Arterienmasse in Aorta	2976	2908,74

HU=Hounsfield Unit

Die Röntgenopazität der Bleimennige (Tab. 7) bewirkte einen hohen Kontrast im CT. Die punktuelle Dichtemessung der Masse in der Aorta zeigte sogar Werte über 2900 HU an (Tab. 16). Jedoch bewirkte diese derart hohe Röntgenopazität eine partielle Überlagerung anderer Strukturen, wie man anhand der Dichtemessungen des Weichgewebes in der Umgebung der Aorta thoracica sehen konnte (Abb. 55).

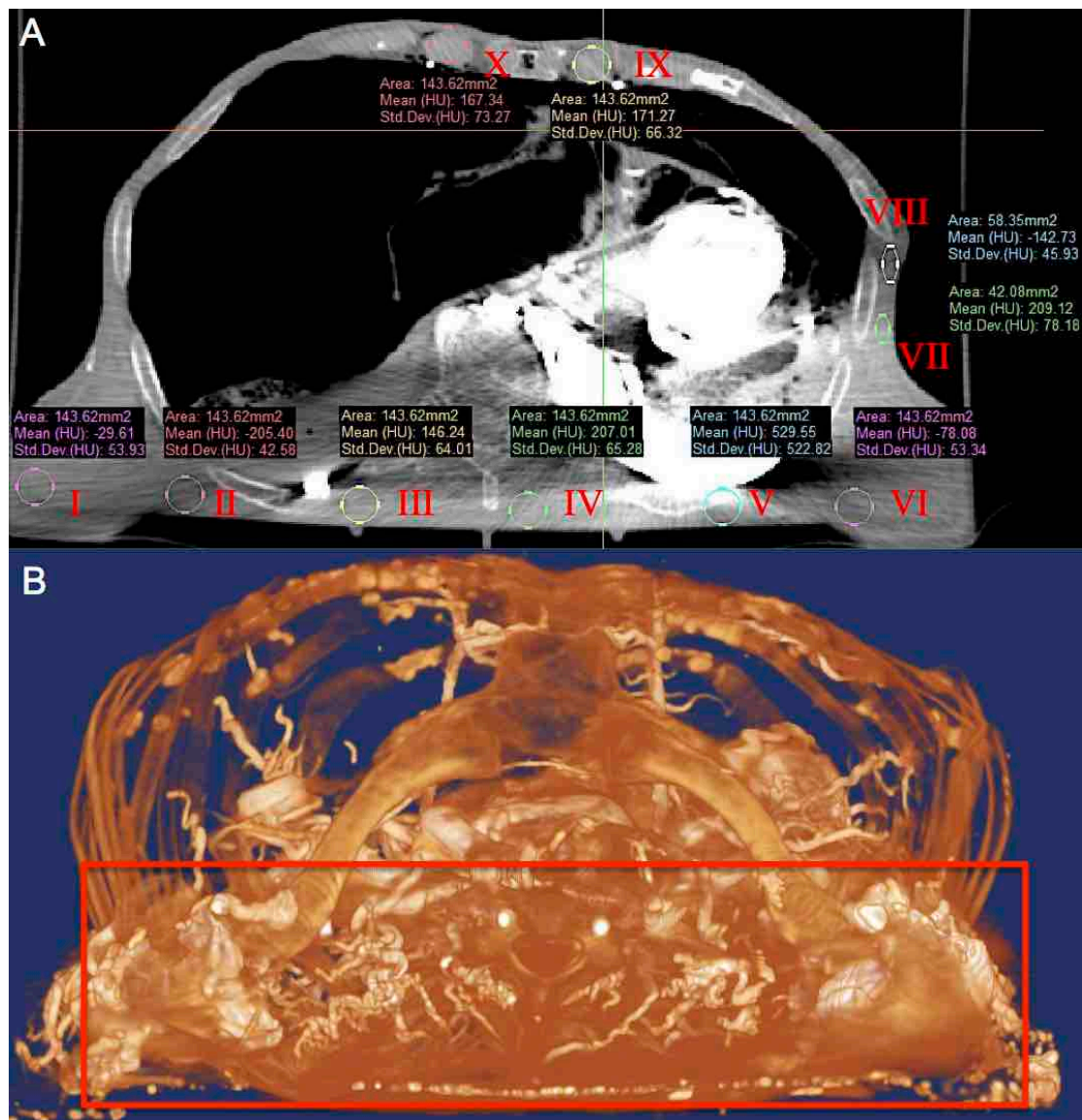


Abb. 55 | Dichtemessung des Weichgewebes an 10 verschiedenen Stellen eines CT-Bildes nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992). Bild (A) Messstellen zur Dichtemessung. Dabei lag der Bereich zwischen -205,40 HU (II) und 529,55 HU (V). Im Bild (B) ist der Thorax dreidimensional von kranial dargestellt. Zu beachten sei hier der mit einem roten Rechteck hervorgehobene Bereich des Rückens, wo Knochen- und Weichgewebe scheinbar eine Masse bilden und nur die sehr hellen, mit der Masse gefüllten Gefäße gut erkennbar sind.

Hier lag der Bereich zwischen -205,40 HU Aorta fern und 529,55 HU Aorta nah (Abb. 55 A). Das hatte zur Folge, dass sich die HU-Werte für Knochen- und Weichgewebe im Bereich des Rückens und der Wirbelsäule oft überlagerten und im 3D-Modell kaum als getrennte Strukturen zu erkennen waren (Abb. 55 B). Demnach war die Segmentierung von Knochengewebe in diesem Bereich mit dem Werkzeug „Thresholding“ nur bedingt möglich und musste mit „Multiple Slice Edit“ Bild für Bild vorgenommen werden (s. 2.6). Dies nahm sehr viel Zeit in Anspruch, weshalb die

90

gesamte Segmentierung mehrere Tage andauerte. Wiederum zeigten die Messungen der Dichte von Knochen- und Weichgewebe im Bereich des Sternums konstante HU-Werte, die sich klar voneinander trennen ließen (Tab. 16). So war es möglich separate Grauwertbereiche für Knochen- und Weichgewebe festzulegen und das Sternum mittels „Thresholding“ vom Weichgewebe semi-automatisch zu segmentieren (Abb. 56).

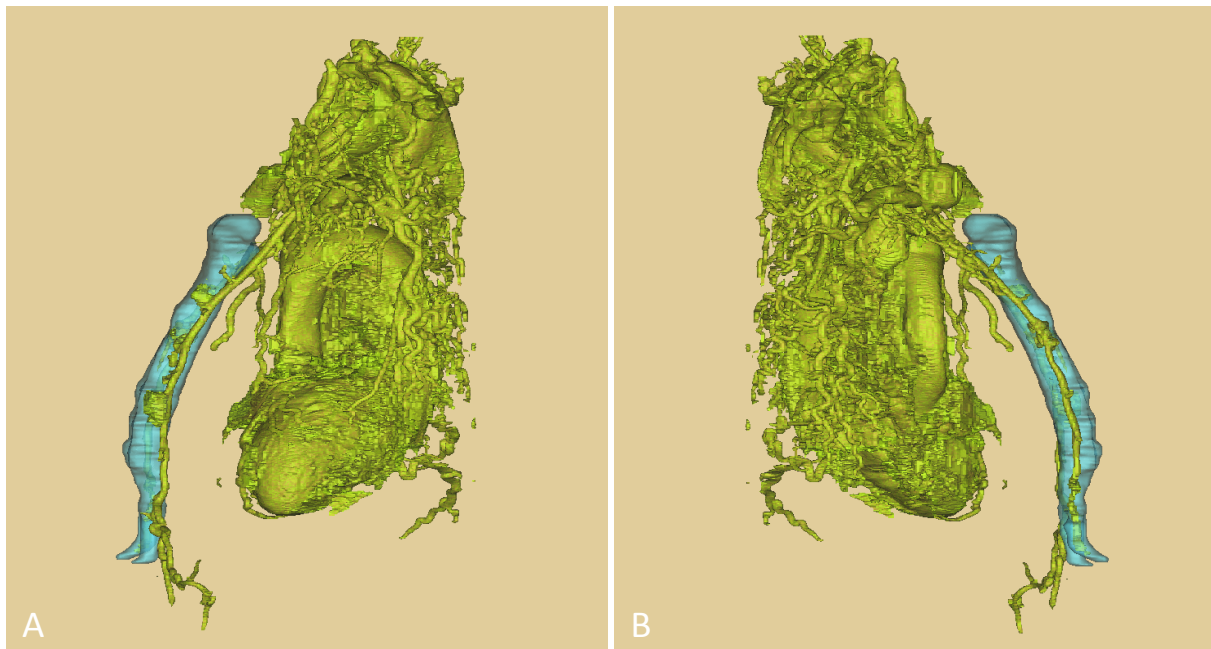


Abb. 56 | Mit Mimics® segmentiertes Sternum einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992) - Ansicht von lateral - türkis = Sternum, grün = Herz und Gefäßsystem

Auf Grund der hohen HU-Werte der Arterienmasse gegenüber Knochen- und Weichgewebe, war es ohne weiteres möglich die gefüllten Abschnitte der ITA mit ihren Abgängen zu segmentieren (Abb. 57).

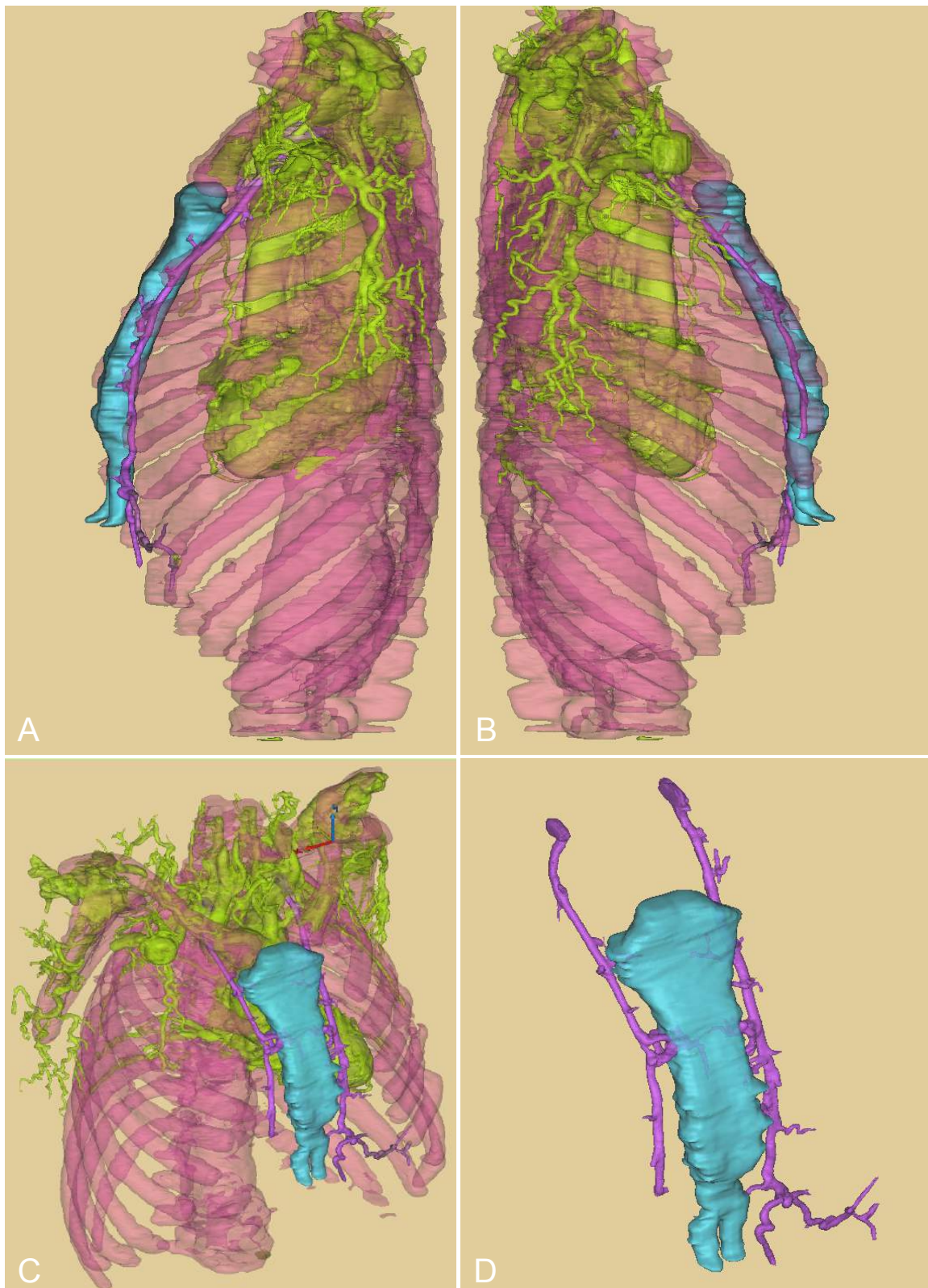


Abb. 57 | 3D-Modell des segmentierten Thorax einer 83 jährigen Thiel-fixierten Spenderin nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992). Bild (A) Ansicht von links, rosa = knöcherner Thorax, türkis = Sternum, grün = Herz und arterielles Gefäßsystem, violett = ITA bds. Bild (B) Ansicht von rechts, (C) von oben rechts und (D) von oben rechts ohne knöchernen Thorax und arteriellem Gefäßsystem

Wie unter Punkt 2.6 beschrieben, konnten die Masken für das arterielle Gefäßsystem und den knöchernen Thorax ausgeblendet und der Verlauf der ITA entlang des Sternums dargestellt werden (Abb. 57 D).



Abb. 58 | Längenmessung der rechten und linken ITA nach Segmentierung mit Mimics®. Die linke ITA ist vom Austritt aus der A. subclavia bis zur Aufteilung in die A. musculophrenica (I) und A. epigastrica sup. (II) 24,7 cm lang und die rechte ITA bis zu ihrem Ende 21,6 cm lang.

Dabei ergab die Längenmessung der linken ITA vom Austrittspunkt aus der A. subclavia bis zur Aufteilung in die A. musculophrenica und A. epigastrica sup. 24,7 cm. Die rechte ITA wiederum besaß eine Länge von 21,6 cm (Abb. 58). Wie auf den Abbildungen zu erkennen ist, konnte die rechte ITA nicht bis auf ihre volle Länge segmentiert werden. Aus diesem Grund wurde zum Vergleich die Segmentierungsarbeit der makroskopischen Präparation gegenübergestellt (Abb. 59).

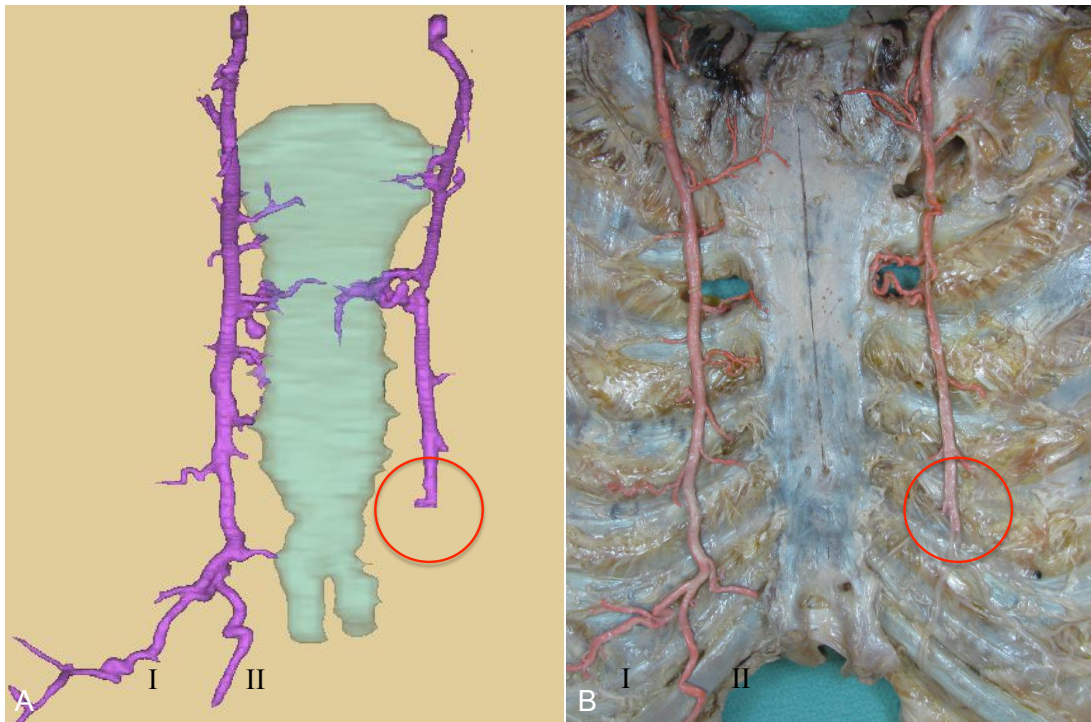


Abb. 59 | Gegenüberstellung von Segmentierung (Mimics®) und makroskopische Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schild nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992). Im Bild (A) ist die paarige ITA (violett) und das Sternum (türkis) von dorsal abgebildet. Bild (B) zeigt die makroskopische Präparation des Thorax-Schildes ebenfalls von dorsal. Bei vollständiger Füllung der linken ITA mit der Arterienmasse zeigt sich deutlich die unvollständige Füllung der rechten ITA (roter Kreis). I = A. musculophrenica, II = A. epigastrica sup.

Sowohl nach Segmentierung (Abb. 59 A) als auch nach makroskopischer Präparation (Abb. 59 B) des Thorax-Schildes zeigte sich deutlich die unvollständig gefüllte rechte ITA. Wiederum konnte die Füllung der linken ITA nach Präparation und Segmentierung über ihrer Aufteilung in die A. musculophrenica und A. epigastrica sup. hinaus verfolgt werden. Abgänge mit einem vergleichsweise großen Durchmesser konnten sehr gut mit der Arterienmasse gefüllt und anschließend segmentiert werden (Abb. 60).

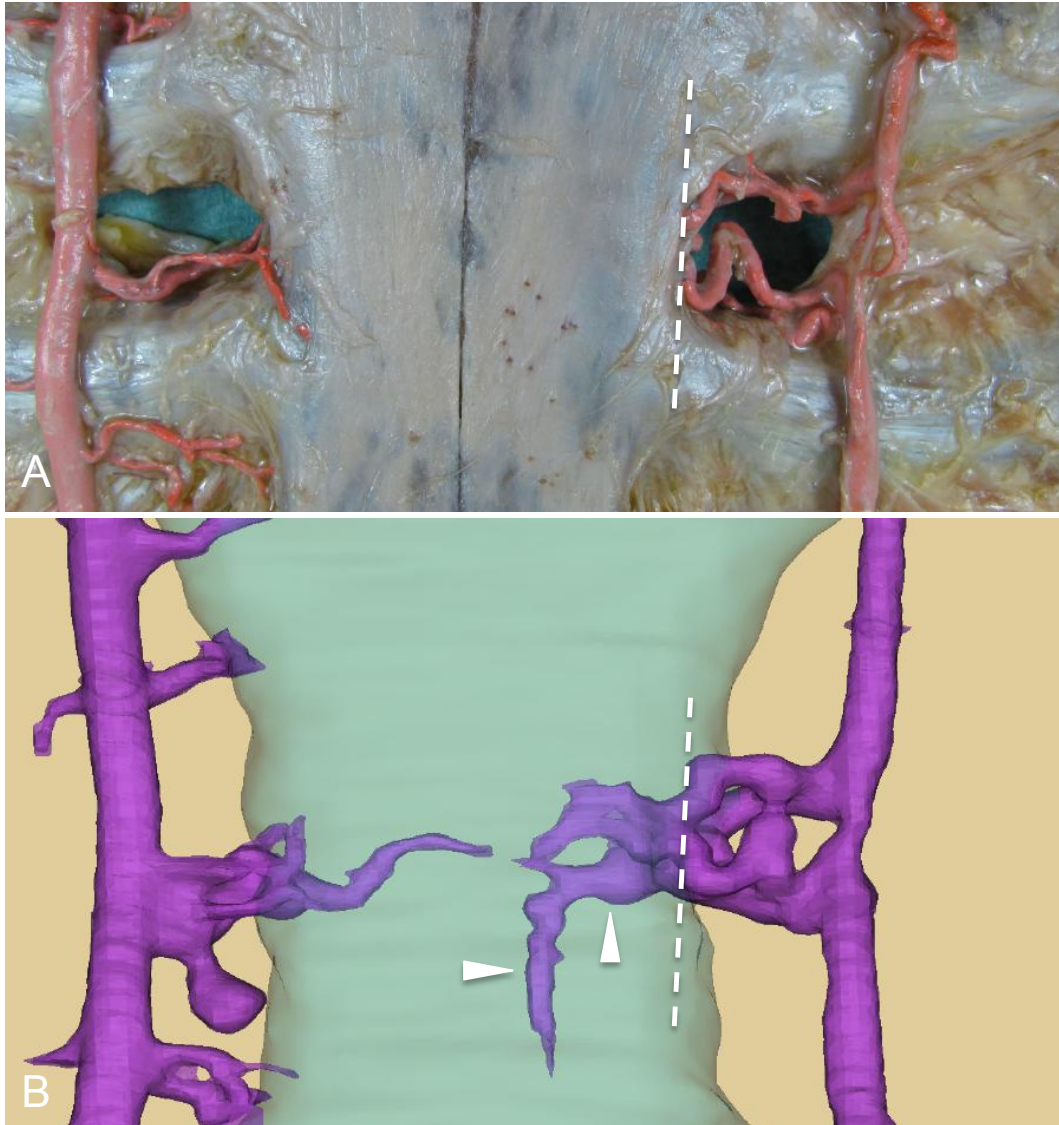


Abb. 60 | Vergrößerte Darstellung der präparierten (A) und segmentierten (B) Perforatoren auf Höhe des 2 ICR nach Arterienmasse-Injektion. Ansicht von dorsal. Die gestrichelte Linie zeigt deutlich den Eintrittspunkt der Perforatoren der rechten ITA in das Sternum, welche nach Segmentierung mit Mimics® (B) über diesen Eintrittspunkt hinaus dargestellt werden können (weiße Pfeile).

Abgänge kleinen Durchmessers hingegen konnten nicht vollständig gefüllt werden. So sind makroskopisch meist nur die proximalen Abschnitte der Abgänge vom Stammgefäß erkennbar (Abb. 61).

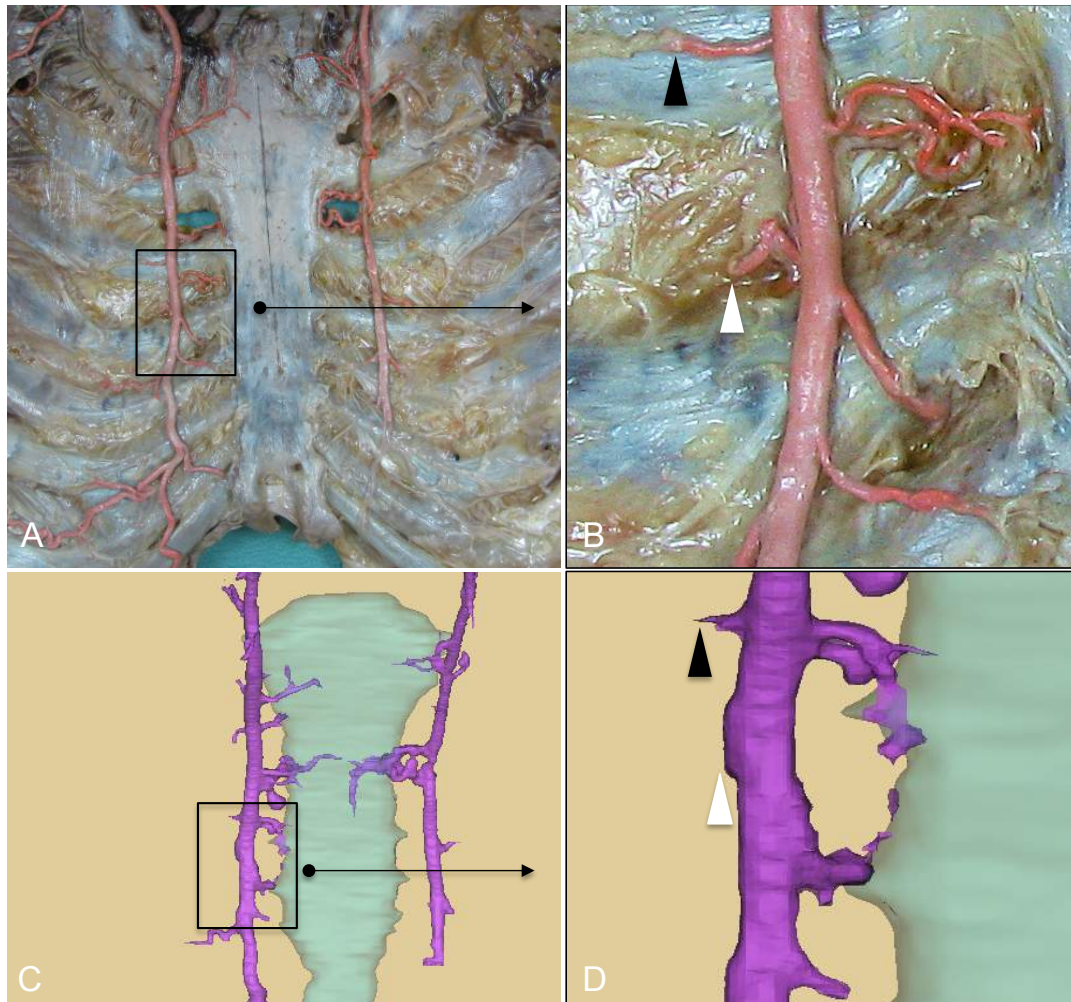


Abb. 61 | Vergleich makroskopische Präparation und Segmentierung mit Mimics® der linken ITA und ihrer Abgänge eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Anwendung der Arterienmasse von Thiel (1992). Im Bild (A) und (C) ist jeweils ein Ausschnitt der linken ITA auf gleicher Höhe zu erkennen (schwarzer Rahmen), der im Bild (B) und (D) vergrößert dargestellt ist. Die unvollständige Füllung ist gut am Beispiel von zwei Aa. intercostales anteriores (schwarzer und weißer Pfeil) zu sehen. Nach Präparation (B) sind immer noch die proximal gefüllten Abschnitte der Aa. intercostales anteriores zu erkennen, die nach Segmentierung (D) kaum (schwarzer Pfeil) oder gar nicht mehr zu erkennen sind (weißer Pfeil).

Wie in Abbildung 61 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Präparation und die segmentierungsbasierte Rekonstruktion der ITA und ihrer Abgänge nur geringfügig. Jedenfalls waren ungefüllte oder teilweise gefüllte Abgänge nach makroskopischer Präparation noch immer identifizierbar, wohingegen nach Segmentierung die feinen Abgänge nur als kurze Stümpfe zu erkennen sind und nicht weiter dargestellt werden konnten (Abb. 61 D).

Da die Masse nach der Herstellung und Injektion aushärtete, konnte das infundierte Gefäßsystem nicht noch einmal zur Wiederholung des Versuches herangezogen

werden. Der Körperspender, bzw. das perfundierte Organ wurde irreversibel verändert und konnte nur noch bedingt in anderen klinische Kursen verwendet werden. Wiederum ließ die Möglichkeit der Präparation des Thorax-Schildes Vergleiche mit den segmentierten Bildern desselben Präparates zu.

Unter Tabelle 17 ist die Beurteilung dieser Methode aufgeführt. Sie wurde mit 27 Punkten bewertet, was 76,66 % der max. Punktzahl und damit der Note 2 entspricht.

Tab. 17 | Beurteilung und Benotung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion einer Thorax-CT am Thiel-fixierten Präparat nach Injektion der Arterienmasse Thiels (1992)

Bewertungskriterien für die segmentierungsbasierte Rekonstruktion nach Arterienmasse-Injektion	Bewertung					Punktzahl 1-5
	- -	-	0	+	++	
Handhabung/Applikation der Injektionsmasse				x		4
Röntgenkontrast der Injektionsmasse				x		4
Reichweite der Injektionsmasse im Gefäßsystem				x		4
Dauer der Segmentierung am PC			x			3
Qualität der segmentierungsbasierten Rekonstruktion					x	5
Wiederverwendbarkeit des Spenders nach Injektion			x			3
Gesamtpunktzahl Note						= 23 = 2

4 Diskussion

Zur besseren Übersicht sei noch einmal das methodische Vorgehen der vorliegenden Arbeit gezeigt:

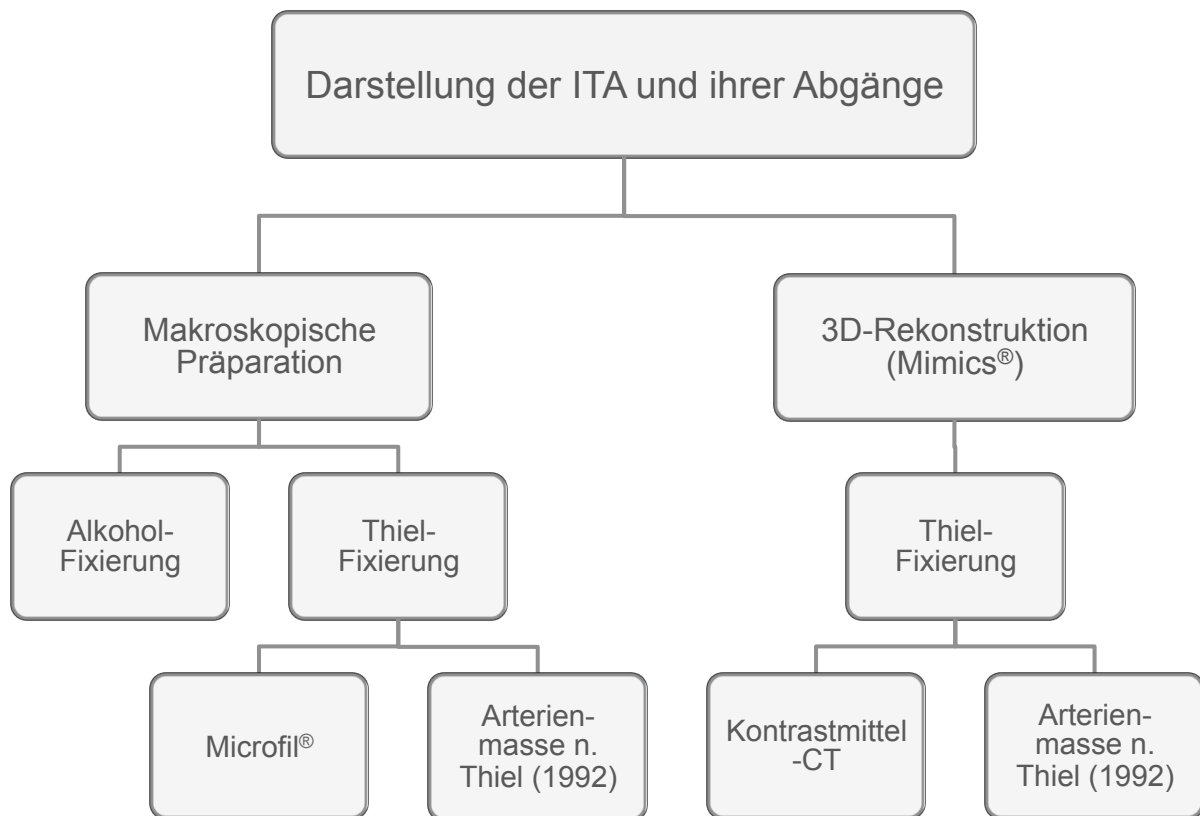


Abb. 62 | Methodik zur Darstellung der ITA und ihren Abgänge.

Im folgenden Vergleich der Fixierungsmethoden und der Methoden zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge waren Messungen von Gefäßkalibern und –längen von untergeordneter Rolle. Dennoch werden die Ergebnisse der Längenmessungen kurz diskutiert, um die Vergleichbarkeit mit der aktuellen Literatur zu prüfen. Der Fokus dieser Arbeit lag vielmehr auf den intravaskulären Injektionstechniken am Thiel-fixierten Humanpräparat und der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mittels Mimics®.

4.1 Länge der ITA

Die Längenangaben der ITAs dieser Studie, gemessen von der ersten Rippe bis zur Bifurcation, decken sich mit den Angaben der aktuellen Literatur (Shah et al. 2017). Dabei handelt es sich um eine klinische Studie, in der intraoperativ Längenmessungen beider Arterien durchgeführt wurden. Frühere makroskopisch-anatomische Studien, die sich mit der ITA und ihrer Abgänge auseinandersetzten, zeigten zum Teil große Unterschiede hinsichtlich der Längenangaben. Je nach Studiendesign wurden zum Teil frische, unfixierte Köperspender verwendet, wodurch die fixierungsbedingte Schrumpfung des Materials umgangen werden konnte. Beispielsweise betrug die durchschnittliche Länge der ITA in einer Studie aus dem Jahre 1997, in der 100 Frischpräparate zur Untersuchung herangezogen wurden, 20,4 cm ($\pm 2,1$ cm) (Henriquez-Pino et al. 1997). Eine so hohe Spenderzahl und die alleinige Verwendung unfixierten Materials konnten aus Kosten- und Lagerungsgründen im Rahmen dieser Promotion nicht realisiert werden. Ebenfalls variierte die gemessene Distanz zwischen Anfangs- und Endpunkt der ITA von Studie zu Studie. Paliouras et al. begannen die Längenmessung der ITA bspw. direkt am Ursprung der A. subclavia (Paliouras et al. 2015). Wiederum maßen Boodhwani et al. (2006) vom Beginn der ersten Rippe bis zu ihrer Aufteilung auf Höhe der sechsten Rippe. Die Aufteilung der ITA kann als Bi- oder als Trifurcation auftreten. Von den oben erwähnten 100 Frischpräparaten überwog in über 90% der Fälle die Bifurcation als Teilungsvariante (Henriquez-Pino et al. 1997). In der vorliegenden Studie wurden nur Bifurcationen gefunden.

4.2 Methodenvergleich zur Darstellung der ITA

Unter Tabelle 18 sind die Noten der einzelnen Methoden nach semi-quantitativer Beurteilung gezeigt.

Tab. 18 | Benotung der einzelnen Methoden

Methode	Punktzahl (Pkt.) und Note
Makroskopische Präparation am Alkohol-fixierten Präparat	19/30 Pkt. = 3
Makroskopische Präparation am Thiel-fixierten Präparat (ohne Injektionstechnik)	21/30 Pkt. = 3
Makroskopische Präparation am Thiel-fixierten Präparat (nach Microfil®-Injektion)	24/30 Pkt. = 2
Makroskopische Präparation am Thiel-fixierten Präparat (nach Arterienmasse-Injektion)	27/30 Pkt. = 1
Segmentierungsbasierte Rekonstruktion nach Kontrastmittel-Injektion	21/30 Pkt. = 3
Segmentierungsbasierte Rekonstruktion nach Arterienmasse-Injektion	23/30 Pkt. = 2

Im direkten Vergleich der Methoden konnte gezeigt werden, dass die makroskopische Präparation am Thiel-fixierten Präparat nach Injektion der Arterienmasse Thiels (1992) sehr gut zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge genutzt werden konnte und am besten für diese Untersuchungen geeignet war (Tab. 18). Demgegenüber erhielt die makroskopische Präparation am Alkohol-fixierten Präparat die Note 3 und war demzufolge die am wenigsten geeignete Methode zur Darstellung des makroanatomischen Gefäßsystems der ITA.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Methoden miteinander verglichen und die Vor- und Nachteile erläutert.

4.2.1 Alkohol- vs. Thiel-Fixierung (ohne Injektion)

Je nach Anforderung werden die Körperspender am Anatomischen Institut Leipzig Alkohol- oder Thiel-fixiert. Die Alkohol-Fixierung wird vor allem für den studentischen Präparierkurs verwendet, währenddessen Thiel-fixierte Körperspender ausschließlich für klinische Kurse am Institut fixiert werden (Hammer et al. 2015). Insofern erschien es sinnvoll, beide Fixierungen im Rahmen dieser Studie hinsichtlich der Präparierfähigkeit von Gefäßen miteinander zu vergleichen. Wie schon unter Punkt 2.2.2 beschrieben, weisen die Gewebe der Körperspender nach Anwendung der Thiel-Fixierung realitätsnahe Eigenschaften hinsichtlich Haptik und Optik auf. Die Muskulatur erschien dunkelrot, das Fettgewebe satt gelb. Eine Unterscheidung der Gewebe war demzufolge möglich und erleichterte die Orientierung am Präparat. Die weiche und flexible Beschaffenheit der Präparate hingegen erschwerte die Präparation, da bspw. Gefäße kaum gegriffen werden konnten. Die hohe Transparenz der Gefäße im nass-glänzenden Präparat beeinträchtigte das Auffinden v.a. kleiner Abgänge. Nur mit großer Sorgfalt konnte das Gefäßsystem der jeweiligen ITA präpariert und dargestellt werden. Dagegen zeigen Gewebe nach Alkohol-Fixierung eher blasse und weniger flexible Eigenschaften (Wacker et al. 2011). Jedoch ließen sich die einzelnen Strukturen, so auch die ITA, durch die feste Konsistenz wesentlich einfacher stumpf präparieren. Gerade im Bereich des Präparierkurses ist die Härtung der Strukturen sinnvoll und erleichtert den Studenten die Präparierübungen am Präparat.

Alkohol-fixierte Präparate zeigen eine größere fixierungsbedingte Schrumpfung. Weichgewebe sind wegen ihres höheren Wasseranteils stärker betroffen als Knochengewebe. Demgegenüber ist die Schrumpfung nach Thiel-Fixierung geringer, was durch den weichen und flexiblen Zustand der Präparate verdeutlicht wird (Knepper 2017). Es erscheint folgerichtig, dass eine erhöhte Schrumpfung des Weichgewebes eine höhere Festigkeit bedingt. Dieses Verhalten wirkt sich jedoch negativ auf die Präparierfähigkeit feiner Strukturen aus. Je feiner die Strukturen sind, desto schwieriger wird die Präparation des Materials nach Alkohol-Fixierung und verringert die Aussagekraft der Präparate (Knepper 2017). Es konnte gezeigt werden, dass das Schrumpfungsverhalten Alkohol-fixierter Präparate zu Verletzungen kleiner sternaler Abgänge vor und während der Präparation führte,

wohingegen Abgänge Thiel-fixierter Präparate flexibel und reißfester erschienen.

Im Vergleich zur Alkohol-Fixierung, wonach die Gefäße wesentlich fester und wegen des im inneren befindlichen geronnenen Blutes tlw. undurchlässig sind, bleiben die ITA und ihre Abgänge nach Thiel-Fixierung durchgängig. Um die Präparierfähigkeit zu verbessern, lassen sich Silikone oder andere Polymere injizieren.

4.2.2 Alkohol- vs. Thiel-Fixierung (Microfil®)

In einer mikrovaskulären Studie zur Anatomie der ITA und ihrer Abgänge aus dem Jahre 1995 wurde das leichtfließende Microfil®-Gemisch verwendet. Durch die guten Materialeigenschaften der roten Masse, wie bspw. der niedrigen Viskosität, gelang es DeJesus und Acland (1995) die ITA mit Abgängen von zehn Frischpräparaten komplett darzustellen. Somit konnten sie die Abgänge der ITA in fünf verschiedene Typen unterteilen (DeJesus und Acland 1995). Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte zwar die ITA eines Thiel-fixierten Körperspenders mit der Masse gefüllt werden. Jedoch reichte der Stempeldruck der Spritze (s. 2.5.1) nicht aus, um Abgänge kleinen Durchmessers zu füllen. Laut DeJesus und Acland (1995) wurde die jeweilige ITA mit einer Kanüle kurz oberhalb der ersten Rippe versorgt und die Masse mit einem Druck von ca. 200 mmHg injiziert. Angaben über Instrumente, wie einer Injektionspumpe o. Ä., konnten der Studie nicht entnommen werden. Wie schon bei Wacker (2012) beschrieben, sollte das Versorgungsgebiet der jeweiligen Arterie intakt sein, da sonst Materialverlust und ein fehlender Gegendruck im Gefäßsystem die Folge sein können. Durch die Entnahme des Thorax-Schildes wurde das Gefäßsystem der ITA unterbrochen, wodurch die Masse während der Injektion entweichen konnte und ein genügend hoher Gegendruck zum Befüllen v.a. kleiner Gefäße fehlte.

Wie schon zuvor beschrieben, ist eine erhöhte Festigkeit der Gefäße während der makroskopischen Präparation, wie es nach Alkohol-Fixierung der Fall ist, von Vorteil. Es konnte gezeigt werden, dass das ausgehärtete Microfil®-Gemisch die Präparierfähigkeit der ITA und ihrer Abgänge im Vergleich zum ungefüllten Thiel-Präparat verbesserte. Im Rahmen dieser Studie konnte gegenüber den Alkohol-fixierten Präparaten jedoch kein wesentlicher Vorteil hinsichtlich der

Präparierfähigkeit beobachtet werden, da ungefüllte Gefäßabschnitte weiterhin nur schwer aufzufinden, bzw. zu präparieren waren. Ein wesentlicher Vorteil des Microfil®-Gemisches besteht jedoch in der intensiv-roten Färbung, wodurch gefüllte Gefäßabschnitte Thiel-fixierter Präparate gut erkannt und dargestellt werden konnten.

Es wird die Wiederholung des Versuches unter Verwendung einer Pumpe für einen genügend hohen Fülldruck zur Darstellung aller Abgänge empfohlen. So ließe sich ein Vorteil gegenüber der Präparierfähigkeit von Gefäßen Alkohol-fixierter Präparat erzielen. Des Weiteren ließe sich das mit dem Microfil®-Gemisch gefüllte Präparat aufgrund seiner radioopaken Eigenschaft radiologisch untersuchen und segmentierungsbasiert rekonstruieren.

4.2.3 Arterienmasse nach Thiel vs. Microfil®

Da die Gefäße der Körperspender nach Thiel-Fixierung weich bleiben und ihren Durchmesser behalten, eignen sie sich hervorragend zur Injektion von harzähnlichen Massen (Kappler et al. 2005). Hierzu beschrieb Walter Thiel eine eigens für seine Fixierungsmethode anwendbare Masse, die Arterienmasse nach Thiel (1992). Wie schon von Hammer et al. (2015) beschrieben, ist die Thiel-Fixierung aufwendig und im Verhältnis zur Alkohol-Fixierung teuer, wodurch die breite Anwendung der Fixierung an anatomischen Instituten nach wie vor gering ist. In einer Studie aus dem Jahre 2011 wurde die weltweite Verbreitung und Anwendung der Thiel-Fixierung untersucht. Von ca. 311 befragten anatomischen Instituten antworteten 109, wobei davon 56% bereits von der Thiel-Fixierung gehört haben und lediglich 10 % diese Methode an ihrem Institut regelmäßig anwenden (Benkhadra et al. 2011).

Aufgrund der geringen Verbreitung dieser Fixierung ließen sich nur wenige Studien bezüglich der Thematik Arterienmasse nach Thiel (1992) am Thiel-fixierten Humanpräparat finden. Unter Tabelle 8 (s. 2.8) ist das Suchergebnis der Literaturrecherche zu diesem Thema gezeigt.

Das Forschungsprofil der Studie von Pils et al. (2014) entsprach trotz der

Verwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992) und anschließender 3D-Rekonstruktion nicht der Thematik dieser Arbeit, da die Masse zur Injektion in einen fettgefüllten Hohlraum der Wange verwendet wurde und somit eine Diskussion über die Reichweite der Arterienmasse in einem Gefäßsystem unmöglich war. Demzufolge eignete sich lediglich die zu Beginn dieses Kapitels erwähnte Studie von Kappler et al. (2005). In dieser anatomischen Studie wurden die Perforatoren der A. circumflexa femoris medialis an 23 Thiel-fixierten Humanpräparaten mittels eines roten und leichtfließenden Silikons fein dargestellt und präpariert, wobei genaue Angaben über den Hersteller und Name des Silikons fehlten (Kappler et al. 2005). Dennoch überzeugten die Ergebnisse der Studie: Perforatoren mit einem Durchmesser von $\geq 0,5$ mm konnten komplett gefüllt und fotografiert werden. Es wurde eine hohe Reichweite des Silikons erreicht. Die eingangs erwähnten positiven Eigenschaften der Thiel-Fixierung, sowie die Festigkeit und der Farbkontrast des Silikons stellten, wie in der vorliegenden Arbeit, die Grundvoraussetzung zur makrovaskulären Studie.

Die hier verwendete Arterienmasse nach Thiel verbesserte die Präparierfähigkeit von gefüllten Gefäßen erheblich. Dennoch konnten nicht alle Abgänge der ITA gefüllt und präpariert werden. Je höher die Reichweite einer Injektionsmasse ist, desto wahrscheinlicher können Gefäße kleinen Durchmessers gefüllt oder Kollateralkreisläufe identifiziert werden. Die Reichweite wiederum hängt im Wesentlichen vom Injektionsdruck ab. Wie bei der Microfil[®]-Technik, scheint auch in diesem Versuch ein mangelnder Druck die Reichweite der Arterienmasse im Gefäßsystem der ITA limitiert zu haben. In der Studie von Kappler et al. (2005) fehlte die genaue Beschreibung der Vorgehensweise zur Injektion des Silikons bzw. Angaben über die Verwendung einer Pumpe oder eines Drucks. Walter Thiel brachte die Arterienmasse mit einem Druck von ca. 0,5 bar rasch über die A. iliaca des jeweiligen Köperspenders ein (Thiel 1992). Auch hier fehlen genaue Angaben über eine Pumpe oder andere Instrumente zur Injektion. Am Anatomischen Institut stand zur Injektion der Masse ein Irregator zur Verfügung, der bis auf eine Höhe von ca. 1 m über das Spenderniveau gebracht werden konnte. Dies entsprach einem Druck von ca. 0,1 bar und lag folglich unter den Beschreibungen Thiels.

Es lässt sich schlussfolgern, dass im Rahmen der vorliegenden Versuche sowohl das Microfil®-Gemisch, als auch die Arterienmasse nach Thiel eine ungenügend hohe Reichweite aufwiesen, wobei als Ursache weniger die jeweilige Masse, sondern der Versuchsaufbau selbst in Betracht gezogen werden sollte. Die Fehlerdiskussion schließt somit das Spendermaterial ein, da ein erhöhtes Alter des jeweiligen Körperspenders mit Veränderungen des Gefäßsystems, wie der Arteriosklerose, einhergeht. Jedoch zeigen die Ergebnisse von Kappler et al. (2005), dass trotz des Alters und der damit verbundenen Veränderungen Körperspender nach Thiel-Fixierung hervorragend für die Injektion von selbsthärtenden Massen geeignet sind.

Nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel zeigten die gefüllten Gefäßabschnitte der ITA, verglichen mit dem ausgehärteten Microfil®-Gemisch, hervorragende Eigenschaften: Die hohe Festigkeit der Masse ermöglichte es, gefüllte Abgänge kleinen Durchmessers bis hin zum Sternum zu verfolgen und zu präparieren. Die ITA imponierte als kräftig gefülltes Gefäß und ließ sich schon ohne jede Präparation erkennen. Die rote Farbe erhöhte den Farbkontrast zum umliegenden Gewebe stark und erleichterte wesentlich die Fotografie des nass-glänzenden Präparates.

Es erscheint somit richtig den Versuch unter Verwendung einer geeigneten Pumpe, bzw. mit einem Injektionsdruck von ca. 0,5 bar zu wiederholen, um alle Abgänge der ITA gleichermaßen füllen zu können.

4.3 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion

Eine weitere Darstellungsoption der ITA und ihrer Abgänge ist die computergestützte Segmentierung mittels Mimics®. Dabei wird die gewünschte anatomische Struktur eines CT-Datensatzes dreidimensional rekonstruiert. Wie gut sich die segmentierungsbasierte 3D-Rekonstruktion im Methodenvergleich zur Darstellung der ITA eignet, ist ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Studie.

4.3.1 Interpretation der Bilder und Methodenvergleich

Um die Frage beantworten zu können, ob die segmentierungsbasierte Rekonstruktion der makroskopischen Präparation überlegen ist, wurde in der vorliegenden Studie eine CT eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Injektion der Arterienmasse angefertigt und nachfolgend segmentiert (s. 2.6.2). Anschließend wurde dasselbe Thorax-Schild makroskopisch präpariert und die Ergebnisse mit der Rekonstruktion verglichen.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die makroskopische Präparation als auch die Segmentierung des Thiel-fixierten Präparates nach Anwendung der Arterienmasse (Thiel 1992) zu sehr guten Ergebnissen hinsichtlich der Darstellbarkeit der ITA führten. Bezüglich der Darstellbarkeit von Abgängen kleinen Durchmessers zeigte sich hingegen ein, wenn auch nur geringer Vorteil bei der makroskopischen Präparation dieses Thorax-Schildes.

Wie unter Punkt 2.6 aufgeführt, lassen sich anatomische Strukturen in einer CT aufgrund unterschiedlicher Grauwerte (HU) voneinander unterscheiden und getrennt segmentieren. Knöcherne Strukturen, wie das Sternum, können so gut semi-automatisch mit dem Werkzeug „thresholding“ vom umgebenden Gewebe separiert werden. Jedoch können sich die Grauwerte verschiedener Gewebe, wie bspw. Knochen-, Knorpel- und Weichgewebe überschneiden, sodass eine semi-automatische Rekonstruktion der jeweiligen Strukturen unmöglich ist. Es könnten 3D-Modelle entstehen, die nicht der realen Anatomie entsprechen und so diagnostisch zu Fehldeutungen führen (Hirschfeld 2017). Es konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass die Knochendichte des Thiel-fixierten Humanpräparates tlw. im Bereich von Weichgewebe und tlw. im Bereich der kontrastmittelgefüllten ITA lag. Nach semi-automatischer Segmentierung entstand so ein Modell, welches eine Unterscheidung von ITA, Knochen- und Weichgewebe verhinderte.

Um dennoch ein aussagefähiges 3D-Modell erstellen zu können, musste manuell mit dem Werkzeug „multiple slice edit“ des Programms Mimics® die gewünschte Struktur Bild für Bild aufgesucht und nachgezeichnet werden. Dieser Umstand wiederum erfordert viel Zeit, einiges an Übung und eine hohe anatomische Expertise des Diagnostikers. Die Segmentierungsarbeit des knöchernen Thorax, des Herzens und

beider ITAs des Thiel-fixierten Körperspenders nahm mehrere Tage in Anspruch. Demgegenüber benötigt man zur makroskopischen Präparation eines Thorax-Schildes ca. 3 h.

Die effektive Arbeitszeit, das methodische Vorgehen und die Qualität einer Segmentierung variiert u.a. von Struktur zu Struktur, von Anwender zu Anwender und von Fragestellung zu Fragestellung. Wie Byrne et al. (2016) in ihrer Studie aufführten, ist die Datenlage bezüglich des genauen methodischen Vorgehens mit jeweiligen Zeitangaben zur Bewertung der Qualität einer Segmentierung schwach. Bspw. sind Zeitangaben zur Segmentierung eines Herzens von 15 min bis 120 h gemacht worden. In vielen Studien wiederum lassen sich keine Zeitangaben finden. Gleiches gilt für die methodische Herangehensweise (Byrne et al. 2016). Somit benötigt man zunächst einige Zeit, um sich mit der Software vertraut zu machen, bevor mit der Segmentierung begonnen werden kann. Mit der makroskopischen Präparation hingegen kann gleich begonnen werden. Die Verwendung der Software Mimics® ist in einer Anleitung anschaulich erklärt, jedoch anhand von einfachen Beispielen. Am komplexen Fall, wie dem Thorax eines Humanpräparates, lassen sich automatische Funktionen, die nach wenigen Klicks zum gewünschten 3D-Modell führen, kaum anwenden. Hingegen muss immer wieder auf die manuelle Funktion gewechselt werden. Somit ist das methodische Vorgehen bereits nach einigen Stunden nur schwer nachvollziehbar und die Arbeit eingeschränkt reproduzierbar. Demgegenüber lässt sich die makroskopische Präparation eines Thorax-Schildes sehr gut Schritt für Schritt beschreiben und nachvollziehen. Durch die Orientierung an anatomischen Landmarken und der Präparieranleitung des anatomischen Instituts ist das Vorgehen gut reproduzierbar.

Da die Qualität der Beschreibung von Herangehensweise und Methodik (z.B. semi-automatische Segmentierung) einer Segmentierung mit Mimics® in der Literatur sehr heterogen und teilweise unvollkommen ist, entwarfen Byrne et al. (2016) einen Score zur Bewertung dieser Arbeiten, den *Segmentation descriptive quality (SDQ)*-Score. Dabei wird zwischen drei Gruppen unterschieden:

Tab. 19 | Segmentation Descriptive Quality (SDQ) Score (Byrne et al. 2016)

SDQ	Beschreibung	Beispiel
1	<ul style="list-style-type: none"> - Software wird erwähnt - Methodik wird nicht benannt 	<ul style="list-style-type: none"> - Mimics® - k.A. zu Methodik
2	<ul style="list-style-type: none"> - Software wird erwähnt, - Benennen der jeweiligen Methodik/Werkzeuge - keine detaillierte Beschreibung 	<ul style="list-style-type: none"> - Mimics® - Semi-automatische Segmentierung mit dem Werkzeug ‚thresholding‘ - k.A. zum Vorgehen
3	<ul style="list-style-type: none"> - Software wird genau aufgeführt - genaue und reproduzierbare Beschreibung der Methodik/Werkzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> - Mimics® (Version) - ‚thresholding‘ (semi-automatisch) oder ‚multiple slice edit (manuell) - Qualitative und quantitative Beschreibung des Vorgehens (z.B. an Beispielbilder)

Methodik: automatische, semi-automatische oder manuelle Segmentierung; Werkzeuge (Mimics®): z.B. ‚thresholding‘ oder ‚region growing‘

Byrne et al. (2016) konnten zeigen, dass nur in 27 von 80 Artikeln eine genaue Beschreibung der Methodik und Herangehensweise zu finden war (SDQ=3). Die Qualität der vorliegenden Arbeit ist anhand dieses Scores der Stufe 3 zuzuordnen.

Ein deutlicher Vorteil der Segmentierung gegenüber der Präparation am Thorax-Schild selbst ist die Möglichkeit des Rückgängigmachens. So können Fehler oder Ungenauigkeit während der Segmentierung einfach und schnell korrigiert werden. Ist man während der Präparation am Gefäß unvorsichtig, können Abgänge kleinen Durchmessers unbemerkt zertrennt und im schlimmsten Fall nicht mehr aufgefunden werden. Es ist selbstverständlich, dass diese einzelnen Schritte einer Präparation nicht rückgängig gemacht werden können.

Da es sich um dasselbe Präparat handelte, ließen sich Vergleiche zwischen der makroskopischen Präparation und dem 3D-Modell ziehen. Es konnte gezeigt werden, dass Abgänge kleinen Durchmessers am Präparat präziser dargestellt werden konnten, als am PC mittels Mimics®. Es erscheint somit sinnvoll, dass der gesamte Versuch ein weiteres Mal unter Verwendung eines höherauflösenden CTs vorgenommen wird.

4.4 Vergleich mit anderen Methoden zur Gefäßdarstellung

Neben den im Rahmen dieser Studie angewandten Methoden zur Darstellung von Gefäßsystemen mittels leichtfließender Polymere (Microfil®, Arterienmasse Thiels) lassen sich in der Literatur weitere Systeme auf Acryl-Basis finden. Bspw. wurde in der Studie von Etz et al. aus dem Jahre 2011 ein Injektionskit verwendet, welches gegenüber Kalilauge beständig ist und gleichzeitig eine hohe Fließfähigkeit aufweist (Batson's #17 Anatomical Corrosion Kit). Dieses Kit besteht aus vier Komponenten und kann, ähnlich wie die Microfil® - Masse, einfach angemischt werden. Hingegen ist die Herstellung der Arterienmasse nach Thiel (1992) nur unter Berücksichtigung gewisser Vorsichtsmaßnahmen möglich und zeitintensiv (s. 2.5.2). Im Unterschied zur Arterien- und Microfil®-Masse weist die Batson #17 eine geringere Röntgendichte auf. Die Zugabe von radioopaken Metall-Pudern ermöglicht die Erhöhung des Röntgenkontrastes in einer CT. Bspw. wird während der Herstellung der Arterienmasse nach Thiel Bleimennige hinzugegeben. Jedoch sind viele dieser Puder in der Masse Batsons nicht löslich, weshalb die ausgehärtete Masse in einem weiteren Schritt mit Osmiumtetroxid benetzt wird, um so einen genügend hohen Kontrast in bspw. einer Mikro-CT zu erhalten (Mondy et al. 2013).

Die Reichweite der jeweiligen Masse, also wie gut Gefäße v.a. kleinen Durchmessers gefüllt werden können, hängt einerseits von ihrer Zusammensetzung (Partikelgröße) und dem Injektionsdruck, und andererseits von der Beschaffenheit und dem Zustand der Gefäße ab. Im Rahmen der vorliegenden Studie war es aufgrund der technischen und instrumentellen Voraussetzung nicht möglich, einen kontinuierlich hohen Druck zur Injektion der jeweiligen Masse zu gewährleisten und Gefäße sehr kleinen Durchmessers zu füllen. Die Fragestellung, ob mögliche Kollateralkreisläufe zur Versorgung des Sternums existieren, konnte demzufolge

nicht beantwortet werden. Hingegen erreichte Etz et al. (2011) in seiner Studie hervorragende Reichweiten zur Darstellung des sehr feinen intraspinalen Gefäßsystems, was nicht zuletzt durch die Verwendung einer Herz-Lungen-Maschine am noch lebenden Versuchstier erreicht werden konnte (Etz et al. 2011). Unter realen Operationsbedingungen wurden 12 junge Schweine anästhesiert und über eine Beatmungsmaschine ventiliert, bevor sie an eine Herz-Lungen-Maschine angeschlossen wurden. Mit einem kontinuierlichen Druck von 120-130 mmHg ($\approx 0,15 - 0,17$ bar) wurde das gesamte Blut des Körperkreislaufes ausgewaschen und gegen die Batson #17 - Masse ausgetauscht. Unter diesen Bedingungen konnte das noch flüssige Polymer jedes Gefäß ab einem Durchmesser von $\geq 8 \mu\text{m}$ erreichen und vollständig füllen. Nach dem Aushärten der Masse wurden dem jeweiligen Schwein ganze Gewebe-Blöcke des Rückens entnommen und in ein Bad aus Kalilauge eingelegt, bis sich alle Weichgewebe auflösten. Zurück blieb ein feines Skelett des Gefäßsystems und Knochengewebe (Etz et al. 2011).

Thiels Fixierungsmethode ermöglicht zwar eine realitätsnahe Beschaffenheit der Gefäße, wie sie kurz nach dem Versterben des Menschen vorliegt, jedoch weist der noch lebende Organismus des Schweins physiologische Bedingungen auf, wie bspw. dem Muskeltonus von Arterien und Arteriolen, wodurch ein genügend hoher physiologischer Gegendruck bis in die Kapillaren hinein erhalten bleibt und die Herz-Lungen-Maschine so einen nahezu natürlichen Fluss der Masse bei einem Druck von ca. 120 mmHg erzeugen kann. Aber nicht nur der noch lebende Organismus stellt eine Besonderheit dar, auch ein komplett geschlossenes und intaktes Gefäßsystem ohne arteriosklerotischer Veränderungen, wie es bei einem jungen Schwein anzunehmen ist, sind besondere Umstände. Hingegen weisen viele Körperspender arteriosklerotische Veränderungen auf oder haben im Laufe ihres Lebens mannigfaltige Veränderungen am Herz-Kreislaufsystem, wie bspw. Bluthochdruck oder Herzklappenstenosen, erlebt. Des Weiteren werden Thiel-fixierte Körperspender im Rahmen klinischer Kurse am Institut vielfach verwendet. Dadurch waren die Gefäßsysteme der jeweiligen Körperspender bereits vor Beginn der Untersuchung unterbrochen und die Masse konnte während der Injektion entweichen. Es baute sich kein genügend hoher Gegendruck zum Füllen kleiner Gefäße auf.

In der Studie von McLeod et al. (2017) wurden drei Thiel-fixierte Körperspender als Modelle für endovaskuläre Eingriffe, wie den thorakalen oder abdominellen Aortenersatz, unter klinischen Bedingungen verwendet. Die Spender wurden entsprechend des klinischen Vorgehens prä-operativ und post-operativ computertomographisch untersucht und intra-operativ angiographisch und mittels Druck- und Temperaturkontrolle begleitet. Es gelang ihnen durch die Verwendung einer Herz-Lungen-Maschine einen pulsierenden intraarteriellen Fluss mit einem mittleren arteriellen Druck von ca. 50 mmHg und einer Frequenz von 60 Schlägen pro Minute entlang der Aorta zu erzeugen und so nahezu klinische Bedingungen für die Simulation des oben genannten Eingriffs herzustellen. Die Bilder der prä-operativ durchgeführten Kontrastmittel-CTs lieferten genaue Informationen über sklerotische Veränderungen des Gefäßsystems der Aorta und seiner abgehenden Gefäße. McLeod et al. (2017) konnten somit zeigen, dass Thiel-fixierte Körperspender durch ihre realitätsnahe Beschaffenheit der Gewebe als Modelle für die Simulation und das chirurgische Training endovaskulärer Eingriffe unter annähernd klinischer Bedingungen sehr gut geeignet sind.

Sowohl die Verwendung einer Herz-Lungen-Maschine zur Injektion der Arterienmasse Thiels unter Operationsbedingungen, als auch das Auflösen einer ganzen Leiche in Kalilauge sind aus verschiedenen Gründen am anatomischen Institut Leipzig nicht möglich. Es lässt sich jedoch schlussfolgern, dass Thiel-fixierte Körperspender sehr gute Modelle für intravaskuläre Interventionen und Untersuchungen darstellen. Die Verwendung einer Pumpe, die die Bildung eines genügend hohen Injektionsdrucks bei gleichbleibend hohem Fluss während der Injektion der Arterienmasse erzeugt, bildet dabei die Grundvoraussetzung.

4.5 Schlussfolgerung

Die ITAs Alkohol-fixierter Präparate ließen sich zügig und übersichtlich präparieren. Jedoch erschwerte die fixierungsbedingte Schrumpfung und Härtung der Weichgewebe die Präparation und Darstellung der teilweise sehr feinen Abgänge der ITA. Folglich ist die makroskopische Präparation zur Darstellung kleiner Abgänge oder möglicher Kollateralkreisläufe am Alkohol-fixierten Präparat als ungenügend zu bewerten.

Die Injektion der eigens für die Thiel-Fixierung entwickelten Arterienmasse nach Thiel (1992) eignete sich hingegen sehr gut zur Darstellung und Präparation der ITA und ihrer Abgänge. Wiederum gelang es nicht alle Abschnitte der ITA vollständig zu füllen. Die Ergebnisse und Literaturvergleiche weisen jedoch daraufhin, dass unter Verbesserung der beschriebenen Limitationen dieses Versuches (ungenügend hoher und diskontinuierlicher Druck, unterbrochene Gefäßsysteme, einmalige Anwendung etc.) Darstellungen des kompletten sternalen Gefäßsystems am Thiel-fixierten Präparat erreicht werden können.

Die Anwendung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mittels Mimics® (Materialise HQ, Leuven, Belgien) am Thiel-fixierten Präparat war kompliziert und zeitintensiv, jedoch konnten detaillierte 3D-Modelle des knöchernen Thorax, der ITA und ihrer Abgänge erstellt und am PC betrachtet werden. Die Arbeit zeigt, dass die Anwendung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion mittels Mimics® in Klinik und Wissenschaft zunimmt, aber genaue Beschreibungen des methodischen Vorgehens für die vorliegende Fragestellung fehlen. Die Arbeit liefert dazu eine Beschreibung der Anwendung des Programms am Beispiel zweier Thorax-CTs und macht einen Vorschlag zur möglichen Verwendung dieser Diagnostikhilfe in der Klinik. Die Darstellung von realen Gefäßverläufen am anatomischen Präparat mit Hilfe moderner bildgebender Verfahren liefert neue Einsichten in klinisch relevante Operationsgebiete.

Es ist gelungen die in der vorliegenden Arbeit angewandten präparatorischen Techniken umfassend zu vergleichen und erlaubt einen Einblick in völlig neue Möglichkeiten der Darstellung makroskopischer Strukturen mit Hilfe moderner bildgebender Verfahren einschließlich einer 3D-Rekonstruktion.

5 Zusammenfassung

Tiefe sternale Wundheilungsstörungen sind seltene, aber verheerende Komplikationen nach medianer Sternotomie und Verwendung der A. thoracica interna (ITA) als Bypass in der Kardiochirurgie. Dabei bilden genaue Informationen über die Anatomie der ITA und ihrer feinen Abgänge als Möglichkeit zur Ausbildung von Kollateralkreisläufen ein wichtiges Bindeglied in der Prävention dieser postoperativen Infektionen. Die vorliegende anatomische Arbeit greift dieses Thema auf und stellt erstmalig einen umfassenden Vergleich von klassischen und modernen Methoden zur Darstellung von makroskopischen Strukturen an, die neben der anatomischen Präparation auch die Verwendung modernerer bildgebender Verfahren mit anschließender 3D-Rekonstruktion am PC umfassen.

Die eingangs gestellten Forschungsfragen werden wie folgt zusammenfassend beantwortet:

1) Welche Methodik eignet sich zur Darstellung der ITA und ihrer Abgänge am anatomischen Präparat?

Die im Rahmen dieser Studie angewandten Methoden eigneten sich zur Darstellung der ITA. Jedoch wiesen sie je nach Fixierung ganz verschiedene Herangehensweisen auf, welche großen Einfluss auf die Qualität der Darstellung von vor allem kleinen Abgängen hatten. Die Injektion der Arterienmasse nach Thiel (1992) am Thiel-fixierten Humanpräparat mit anschließender segmentierungsbasierter Rekonstruktion über die Software Mimics® (Materialise HQ, Leuven, Belgien) eigneten sich dazu wesentlich besser, als die rein makroskopische Präparation am Alkohol-fixierten Präparat.

2) Ist die makroskopische Präparation der segmentierungsbasierten Rekonstruktion überlegen?

Es konnte gezeigt werden, dass die makroskopische Präparation von Abgängen kleinen Durchmessers am Thiel-fixierten Humanpräparat nach Injektion der Arterienmasse etwas präziser gelang, als am PC mittels Mimics®, wobei nur geringe Unterschiede beobachtet wurden. Zudem war die Segmentierungsarbeit technik- und zeitintensiv. Der große Vorteil dieser Methode lag jedoch in der Verknüpfung von Bildpunkten (Pixel) zweidimensionaler Bilder, wie die eines CT-Datensatzes, zu

einem dreidimensionalen anatomischen Modell. Die ITA und das Sternum konnten am PC segmentiert und im Raum betrachtet werden, ohne den Körperspender selbst präparieren zu müssen. Die Interpretation der gewonnenen 3D-Modelle zeigt, dass die segmentierungsbasierte Rekonstruktion der ITA und ihrer Abgänge nicht nur am Humanpräparat anwendbar ist, sondern auch am klinische Fall im Rahmen einer präoperativen CT-Diagnostik probiert und verwendet werden könnte.

3) Wie kann man die Ergebnisse semi-quantitativ erfassen?

Durch die Verwendung einer Bewertungstabelle gelang es, weichen, nicht unmittelbar messbaren Faktoren einer Methode, wie die Beurteilung der Präparierfähigkeit von Weichgeweben oder die Flexibilität von Gefäßen je nach Fixierung, positive oder negative Werturteile zuzuordnen und diese durch entsprechende Zahlenwerte zu quantifizieren (semi-quantitative Beurteilung). Durch die Verwendung eines Punkte-Schlüssels ließen sich die Methoden benoten. Auf diese Weise war der Vergleich der Methoden untereinander möglich und half, konkrete Schlussfolgerungen zu formulieren.

4) Lassen sich Kollateralkreisläufe zur Versorgung des Sternums mit den verwendeten Methoden darstellen?

Mit den gewählten Methoden konnte das makroanatomische Gefäßsystem der ITA dargestellt werden, jedoch keine kollateralen Blutkreisläufe zur Versorgung des Sternums. Dennoch konnte gezeigt werden, dass Thiel-fixierte Präparate durch ihre realitätsnahen Gewebeeigenschaften sehr gut für Untersuchungen der vaskulären Anatomie geeignet sind und unter Verwendung einer geeigneten Pumpe zur Injektion darstellender Massen, wie sie in der Literatur bereits aufgeführt worden, deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können.

6 Literaturverzeichnis

1. Benkhadra M, Gerad J, Genelot D, Trouilloud P, Girard C, Anderhuber F, Feigl G: Is Thiel's embalming method widely known? A world survey about its use. *Surg Radiol Anat* 2011 33(4):359-63
2. Boodhwani, M; Lam, BK; Nathan, HJ; Mesana, TG; Ruel, M; Zeng, W; Selke, FW; Rubens, FD: Skeletonized Internal Thoracic Artery Harvest Reduces Pain and Dysesthesia and Improves Sternal Perfusion After Coronary Artery Bypass Surgery. A Randomized, Double-Blind, Within-Patient Comparison. *Circulation* 2006;114(8):766-73
3. Byrne N, Velasco FM, Tandon A, Valverde I, Hussain T: A systematic review of image segmentation methodology, used in the additive manufacture of patient-specific 3D printed models of the cardiovascular system. *JRSM Cardiovasc Dis* 2016;5: 1–9
4. Dalton ML, Connally SR, Sealy WC: Julian's reintroduction of Milton's operation, *Ann Thorac Surg* 1992; 53(3):532-3
5. DeJesus RA, Acland RD: Anatomic Study of the Collateral Blood Supply of the Sternum *Ann Thorac Surg* 1995; 59(1):163-8
6. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM): About DICOM, in : <http://dicom.nema.org/Dicom/about-DICOM.html> (10.08.2016)
7. Dürtleman N, Massard G: Sternotomy. *Multimed Man Cardiothorac Surg* 2006 Jan 1;2006(810):mmcts.2006.001875
8. Etz C, Kari FA, Mueller CS, Silovitz M, Brenner R, Hung-Mo Lin, Griepp RB: The Collateral Network Concept: A Reassessment of the Anatomy of Spinal Cord Perfusion. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2011; 141(4): 1020–1028
9. Gattia G, Dell'Angelab L, Barbatib G, Benussia B, Fortia G, Gabriellia M, Raubera E, Luzzatic R, Sinagrab G, Pappalardo A: A predictive scoring system for deep sternal wound infection after bilateral internal thoracic artery grafting. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2016; 49(3):910-7
10. Graubner B: ICD and OPS. Historical development and current situation. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 2007; 50(7):932-43
11. Gummert JF, Barten MJ, Hans C, Kluge M, Doll N, Walther T, Hentschel B,

- Schmitt DV, Mohr FW, Diegeler A: Mediastinitis and cardiac surgery an updated risk factor analysis in 10,373 consecutive adult patients. *Thorac Cardiovasc Surg* 2002; 50(2):87-91
12. Hammer N, Löffler S, Feja C, Sandrock M, Schmidt W, Bechmann I, Steinke H: Enthanol-Glycerin Fixation with Thymol Conservation: A Potential Alternative to Formaldehyde and Phenol Embalming. *Anat Sci Educ*, 2012; 5(4): 225-233
 13. Hammer N, Löffler S, Bechmann I, Steinke H, Hädrich C, Feja C: Comparison of Modified Thiel Embalming and Enthanol-Glycerin Fixation in an Anatomy Environment: Potentials and Limitations of Two Complementary Techniques. *Anat Sci Educ* 2015; 8(1):74-85
 14. Hammer N, Hirschfeld U, Strunz H, Werner M, Wolfskämpf T, Löffler S: Can the Diagnostics of Triangular Fibrocartilage Complex Lesions Be Improved by MRI-Based Soft-Tissue Reconstruction? An Imaging-Based Workup and Case Presentation. *Biomed Res Int*. 2017; 2017:5870875
 15. Henriquez-Pino JA, Gomes WJ, Prates JC, Buffolo E: Surgical Anatomy of the Internal Thoracic Artery. *Ann Thorac Surg* 1997;64:1041–5
 16. Hirschfeld U: Verbesserung der Diagnostik des Triangulären Fibrokarilaginären Komplexes (TFCC) durch bildgestützte Rekonstruktion, Dissertation an der medizinischen Fakultät der Universität Leipzig, Institut für Anatomie, 2017
 17. Horan TC, Gaynes RP, Martone WJ, Jarvis WR, Grace EW: CDC definitions of nosocomial surgical site infections, 1992: A modification of CDC definitions of surgical wound infections. *Am J Infect control* 1992; 20(5):271-4
 18. Institut für Anatomie der Universität Leipzig: Präparieranleitung zum makroskopisch- anatomischen Kurs Zahnmedizin, Institut für Anatomie, Universität Leipzig, Version 02/2017, http://anatomie.medizin.uni-leipzig.de/index.php?id=texte/link_lehre/materialien.php&b=lehre/praepsaal02.png (22.04.201)
 19. ICD-10: Internationale Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme Bd. 1 – Systematisches Verzeichnis Version 1.3, DIMDI (Deutsches Institut für medizinische Dokumentation und Information) (Hrsg.), 2. Auflage, 10. Revision, Verlag Hans Huber, Bern, Göttingen, Toronto, 2001
 20. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol. World Health Organization International Agency For Research On Cancer (IARC) 2006 ,Vol. 88

21. Jaung R, Cook P, Blyth P: A Comparison of Embalming Fluids for Use in Surgical Workshops. Clin Anat 2011; 24(2):155-61
22. Kappler UA, Constantinescu MA, Büchler U, Vögelin E: Anatomy of the proximal cutaneous perforator vessels of the gracilis muscle. Br J Plast Surg 2005; 58(4):445-8
23. Knepper R: Darstellung des Verlaufs der Arteria palatina major unter dem Aspekt der Entnahme autologer Bindegewebstransplantate aus dem Gaumen, Dissertation an der medizinischen Fakultät der Universität Leipzig, Institut für Anatomie, 2017
24. Leutert G: Systematische Anatomie des Menschen. 327 Abbildungen. Rolf Bertoloni (Hrsg.). 5., vollst. Neubearb. Aufl.- Berlin; Wiesbaden : Ullstein Mosby, 1995
25. Lamba R, McGahan JP, Corwin MT, Li CS, Tran T, Seibert JA, Boone JM: CT Hounsfield numbers of soft tissues on unenhanced abdominal CT scans: variability between two different manufacturers' MDCT scanners, AJR Am J Roentgenol. 2014; 203(5):1013-20
26. Levi C, Gray JE, McCoullough EC, Hattery RR: The unreliability of CT numbers as absolute values, AJR Am J Roentgenol. 1982;139(3):443-7
27. Mangram AJ, Horan TC, Pearson ML, Silver LC, Jarvis WR: Guideline for Prevention of Surgical Site Infection, 1999. Centers for Disease Control and Prevention (CDC) Hospital Infection Control Practices Advisory Committee. Am J Infect Control, 1999; 27(2):97-132
28. Materialise's Mimics® Innovation Suite: Medical Image Segmentation for Engineering on Anatomy™, <http://biomedical.materialise.com/mimics> , (10.08.2016)
29. Mauermann WJ, Sampathkumar P, Thompson RL: Sternal wound infections. Best Pract Res Clin Anaesthesiol 2008;22(3):423-36.
30. McLeod H, Cox BF, Robertson J, Duncan R, Matthew S, Bhat R, Barclay A, Anwar J, Wilkinson T, Melzer A, Houston JG: Human Thiel-Embalmed Cadaveric Aortic Model with Perfusion for Endovascular Intervention Training and Medical Device Evaluation. Cardiovasc intervent radiol 2017; 40(9):1454-1460
31. Mondy WL, Casteleyn C, Loo DV, Raja M, Singleton C, Jacot JG: Osmium tetroxide labeling of (poly)methyl methacrylate corrosion casts for

enhancement of micro-CT microvascular imaging. *Microsc and Microanal* 2013;19(6):1416-27

32. Neumaier S, Klose P, Dirschedl P: [Basic knowledge about the current status of the new reimbursement system, the German coding guidelines in psychiatry/psychosomatic medicine and the use of ICD-10-GM/OPS], *Gesundheitswesen*, 2012; 74(10):678-84
33. Ninković MM, Schwabegger AH, Anderl H: Internal mammary vessels as a recipient site. *Clin Plast Surg* 1998; 25(2):213-21
34. Paliouras D, Rallis T, Gogakos A, Asteriou C, Chatzinikolaou F, Georgios T, Tsirgogianni K et al. : Surgical anatomy of the internal thoracic arteries and their branching pattern: a cadaveric study. *Ann Transl Med* 2015; 3(15):212
35. Pils U, Rosmarin W, Anderhuber F: The Premaxillary Space: A Location for Filler Injection? *Dermatol Surg* 2014; 40(3):301–304
36. Raman J, Song DH, Bolotin G, Jeevanandam V: Sternal closure with titanium plate fixation – a paradigm shift in preventing mediastinitis, *Interact Cardiovasc Thoracic Surg* 2005; 5(4):336-339
37. Schiebeler TH: *Anatomie*, Heidelberg: Steinkopff-Verlag (Anatomie 10. Auflage), 2007
38. Shah SR, Shah SA, Jangda M, Yaqub M, Jangda A, Khan M et al.: Topical vasodilator response in skeletonized internal mammary artery: Is there really a difference? *Avicenna J Medic* 2017; 7(1):23–7.
39. Spindler N, Lehmann S, Steinau HU, Mohr FW, Langer S: Komplikationsmanagement nach Eingriffen an Thoraxorganen; Tiefe sternale Wundinfektionen. *Der Chirurg*, 2015; 86(3):228-33
40. Steinmann WF: *Makroskopische Präparationsmethoden in der Medizin*, 12 Abbildungen, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1982
41. Thiel W: Die Konservierung ganzer Leichen in natürlichen Farben. *Ann Anat* 1992; 174:185-195
42. Thiel W: Eine Arterienmasse zur Nachinjektion bei der Konservierung ganzer Leichen. *Ann Anat* 1992; 174:197-200
43. Thiel W: Ergänzung für die Konservierung ganzer Leichen nach W. Thiel. *Ann Anat* 2002; 184: 267-296

- 44.**Tillmann BN: Anatomie. 1296 Abbildungen. Heidelberg: Springer Medizin Verlag 2010
- 45.**Toumpoulis IK, Anagnostopoulos CE, DeRose JJ, Swistel GD: The Impact of Deep Sternal Wound Infection on Long-term Survival After Coronary Artery Bypass Grafting. Chest 2005; 127(2):464-71
- 46.**Universitätsbibliothek Leipzig (UBL): Fachspezifische Schulungen für Medizin, Veterinärmedizin, Naturwissenschaften und Psychologie, <https://www.ub.uni-leipzig.de/service/schulungen/fachspezifische-angebote/#c1371> (15.04.2018)
- 47.**Wacker A: Anatomische Voraussetzung für die pedale Bypass-Revaskularisation und der Stellenwert der Makroskopie, Dissertation an der medizinischen Fakultät der Universität Leipzig, Institut für Anatomie, 2012, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa-82187>
- 48.**Wacker A, Dahl P, Scheinert D, Feja C, Löffler S: Arterielle Gefäßvariationen am Unterschenkel und Fuß - Anatomische Voraussetzungen für pedale und krurale Bypassoperationen. Gefäßchirurgie, 2011; 16: 590-594
- 49.**World Health Organization (WHO) : History of ICD, <http://www.who.int/classifications/icd/en/> Page updatet on 29 June 2016, (20.07.2016)
- 50.**Wurzinger LJ: Anatomie, 1822 Abbildungen, Stuttgart: Thieme (Duale Reihe, 2. Auflage), 2010
- 51.**Wöckel C: Schulungsmaterial - Literaturrecherche mit PubMed, Universitätsbibliothek Leipzig, Universität Leipzig, 2017, <https://www.ub.uni-leipzig.de/service/schulungen/fachspezifische-angebote/#c1371> (15.04.18)
- 52.**Wöckel C: Schulungsmaterial - Literaturrecherche mit Web Of Science, Universitätsbibliothek Leipzig, Universität Leipzig, 2017, <https://www.ub.uni-leipzig.de/service/schulungen/fachspezifische-angebote/#c1371> (15.04.18)

7 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1 Übersicht der Brusthöhle	2
Abb. 2 Übersicht des Sternums	4
Abb. 3 Abgänge der ITA unterteilt in fünf Typen (DeJesus und Acland 1995)	5
Abb. 4 Die A. intercostalis post. als kollaterales Gefäß zur Versorgung des Sternums	5
Abb. 5 Thiel-fixiertes Humanpräparat nach Präparation der vorderen Brustwand und Darstellung der ITA	7
Abb. 6 Die mediane Sternotomie als Standardzugang zur Brusthöhle in der Kardiochirurgie	8
Abb. 7 Schematische Darstellung einer tiefen inzisionsbedingte SSI und einer SSI der Organ/Körperhöhle	11
Abb. 8 Klinischer Fall einer 77 jährigen Patientin nach medianer Sternotomie	13
Abb. 9 Klinischer Workshop zur Arthroskopie der Schulter an einem Thiel-fixierten Körperspender.....	22
Abb. 10 Vergleich zweier Thorax-Schilder nach Alkohol-Fixierung und Thiel-Fixierung	25
Abb. 11 Methodik zur Darstellung von ITA und Abgängen	27
Abb. 12 Entnahme des Thorax-Schildes einer 97 jährigen Alkohol-fixierten Spenderin	30
Abb. 13 Instrumentarium zur Präparation der ITA	31
Abb. 14 Präparation von ITA und Abgänge am Beispiel eines Alkohol-fixierten Thorax-Schildes	32
Abb. 15 Das Injektionskit (Microfil®)	33
Abb. 16 Lagerung des Thiel-fixierten Thorax-Schildes	34
Abb. 17 Vorbereitung des Thorax-Schildes für die Injektion der Microfil®-Masse ..	35
Abb. 18 zeitliche Abfolge der Microfil®- Injektion	36
Abb. 19 Injektion des Microfil®-Gemisches	37
Abb. 20 Materialien zur Herstellung der Arterienmasse (Thiel 1992)	39
Abb. 21 Herstellung der Arterienmasse nach Thiel (1992)	39
Abb. 22 Anlage des Ventils mit Infusionssystem in die Aorta abdominalis	41
Abb. 23 Befüllen des Irregators und des Infusionssystems mit der Arterienmasse nach Thiel (1992)	42

Abb. 24 Thiel-fixiertes Thorax-Schild nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992)	44
Abb. 25 Die Hounsfield-Skala	46
Abb. 26 Segmentierung des knöchernen Thorax einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Kontrastmittel-CT	47
Abb. 27 Dichtemessung mit Mimics® am Beispiel einer Kontrastmittel-CT einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin	48
Abb. 28 Verwendung des Werkzeuges „Multiple Slice Edit“ am Beispiel der ITA einer 83 Thiel-fixierten Spenderin	49
Abb. 29 Kontrastmittel-CT des Thorax einer Thiel-fixierten 83 jährigen Körperspenderin nach Unterbinden des Stromgebietes der ITA	51
Abb. 30 Auslesen eines CT-Datensatzes und Erstellen von neuen Projekten in Mimics®	52
Abb. 31 Übersichtsmodell des zuvor konvertierten Datensatzes der Kontrastmittel CT einer 83 jährigen Thiel fixierten Körperspenderin.....	53
Abb. 32 Bildschirmfoto während der Segmentierung mit Mimics®	54
Abb. 33 Übersichtsmodell der Thorax-CT einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992)	55
Abb. 34 Segmentierungsbasierte Rekonstruktion der ITA und des Sternums	56
Abb. 35 Suchergebnisse nach Eingabe des Suchbegriffes „(mass after thiel) AN injection“ in den medizinischen Datenbanken PubMed und des WEB OF SCIENCE	60
Abb. 36 Länge der ITAs und die Anzahl ihrer Abgänge je Körperspender	63
Abb. 37 Anzahl der abgehenden Gefäße je ITA je Spender.....	64
Abb. 38 Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Spender-Nr.1, Tab. 5)	65
Abb. 39 Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Spender-Nr.2, Tab. 5)	65
Abb. 40 Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Spender-Nr.3, Tab. 5)	66
Abb. 41 Skizze der ITA und ihrer Abgänge (Spender-Nr.4, Tab. 5)	66
Abb. 42 Präparation des Abgangs der ITA eines Alkohol-fixierten Thorax-Schildes	67
Abb. 43 Perforation eines Abgangs der ITA	68
Abb. 44 Thiel-fixiertes Thorax-Schild vor Anwendung der Microfil®-Technik.....	70
Abb. 45 Präparierte ITA und Abgänge nach Anwendung der Microfil®-Technik eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes.....	72
Abb. 46 Präparierte ITA und Abgänge nach Anwendung der Microfil®-Technik eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes.....	73

Abb. 47 Präparierte ITA eines Thiel-fixierten Körperspenders nach Injektion der Arterienmasse Thiels (1992)	76
Abb. 48 Präparation der ITA und ihrer Abgänge nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992) an einem Thiel-fixierten Körperspender	77
Abb. 49 Übersichtsaufnahme des zu segmentierenden Thorax einer Thiel-fixierten Körperspenderin nach Kontrastmittel-CT. Bild	79
Abb. 50 Dichtemessungen von Kontrastmittel (KM), Knochen- und Weichgewebe der Thorax-CT einer Thiel-fixierten Körperspende	81
Abb. 51 Segmentierungsversuch der A. intercostalis posteriores nach KM-CT	83
Abb. 52 Segmentierung des knöchernen Thorax, der Aorta und der Aa.intercostales posteriores der KM-CT einer 83 jährigen Thiel fixierten Spenderin	84
Abb. 53 3D-Übersichtsmodell des Thorax einer 83 jährigen Thiel-fixierten Spenderin nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992).....	87
Abb. 54 Dichtemessungen von Arterienmasse, Knochen- und Weichgewebe der CT einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992)	88
Abb. 55 Dichtemessung des Weichgewebes an 10 verschiedenen Stellen eines CT-Bildes nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992)	90
Abb. 56 Mit Mimics® segmentiertes Sternum einer 83 jährigen Thiel-fixierten Körperspenderin nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992).....	91
Abb. 57 3D-Modell des segmentierten Thorax einer 83 jährigen Thiel-fixierten Spenderin nach Anwendung der Arterienmasse nach Thiel (1992).....	92
Abb. 58 Längenmessung der rechten und linken ITA nach Segmentierung mit Mimics®	93
Abb. 59 Gegenüberstellung von Segmentierung (Mimics®) und makroskopische Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schild nach Anwendung der Arterienmasse Thiels (1992)	94
Abb. 60 Vergrößerte Darstellung der präparierten und segmentierten Perforatoren auf Höhe des 2 ICR nach Arterienmasse-Injektion	95
Abb. 61 Vergleich makroskopische Präparation und Segmentierung mit Mimics® der linken ITA und ihrer Abgänge eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Anwendung der Arterienmasse von Thiel (1992)	96
Abb. 62 Methodik zur Darstellung und von ITA und ihrer Abgänge.....	98

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Todesursachen laut Totenschein	17
Tab. 2 Hersteller- und Mengenangaben der für die Alkohol-fixierung verwendeten Materialien.....	20
Tab. 3 Mischverhältnis in Abhängigkeit vom BMI.....	20
Tab. 4 Eigenschaften, Hersteller und Mengen der verwendeten Materialien der Thiel-Fixierung.....	22
Tab. 5 Untersuchungsmethode je Körperspender	28
Tab. 6 Mischverhältnis zur Herstellung einer 100 ml Microfil®-Lösung	35
Tab. 7 Eigenschaften, Hersteller und Mengen der verwendeten Materialien der Arterienmasse Thiel (1992)	40
Tab. 8 Themenspezifische Studienauswahl.....	60
Tab. 9 Länge jeder ITA und Anzahl der jeweiligen Abgänge	62
Tab. 10 Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation Alkohol-fixierter Thorax-Schilder	69
Tab. 11 Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes (ohne Injektionstechnik).....	71
Tab. 12 Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Microfil®-Injektion	74
Tab. 13 Beurteilung und Benotung der makroskopischen Präparation eines Thiel-fixierten Thorax-Schildes nach Arterienmasse-Injektion	78
Tab. 14 HU-Werte von Knochengewebe, Weichgewebe und Kontrastmittel der Thorax-CT einer Thiel-fixierten Körperspenderin	82
Tab. 15 Beurteilung und Benotung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion einer Thorax-CT nach Kontrastmittelinjektion am Thiel-fixierten Präparat. 85	
Tab. 16 HU-Werte von Knochengewebe, Weichgewebe und der Arterienmasse der Thorax-CT einer Thiel-fixierten Körperspenderin	89
Tab. 17 Beurteilung und Benotung der segmentierungsbasierten Rekonstruktion einer Thorax-CT am Thiel-fixierten Präparat nach Injektion der Arterienmasse Thiels (1992)	97
Tab. 18 Benotung der einzelnen Methoden	100
Tab. 19 Segmentation Descriptive Quality (SDQ) Score (Byrne et al 2016).....	108

9 Danksagung

Besonders danken möchte ich meiner Betreuerin Frau PD Dr. Sabine Löffler für ihre Ausdauer, Engagement, Motivation und ihrer unermüdlichen Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit in den letzten fünf Jahren. Vielen Dank für Ihre Geduld und den vielen Ratschlägen. Durch Ihren Zuspruch und Ihre Unterstützung bekam ich ein Stipendium, welches das Studium und schließlich diese Arbeit schreiben zu dürfen ermöglichte. Vielen herzlichen Dank dafür.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr. med. Nick Spindler für die Bereitstellung der klinischen Bilder und der Zusammenarbeit an einem gemeinsamen Fachartikel danken.

Mein Dank gilt auch Frau Dr. Christine Feja für ihre umfangreiche Hilfestellung bei der Umsetzung der Versuche sowie ihren vielen Erfahrungen im Umgang mit den einzelnen Präparationstechniken. Durch Ihre Geduld und Ihren Zuspruch tragen Sie ebenfalls einen großen Anteil an der Verwirklichung dieser Arbeit.

Herrn Dr. Niels Hammer möchte ich für die intensive Betreuung im Umgang mit der Software Mimics® und den dazugehörigen technischen Mitteln danken. Mein Dank gilt auch den Sektionstechnikern des Instituts für Anatomie Leipzig Herrn Oehme und Herrn Deubel für ihre Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Versuche.

Durch die Hilfe der Mitarbeiter des Instituts für Rechtsmedizin der Universität Leipzig konnten die computertomographischen Untersuchungen am Humanpräparat durchgeführt werden. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Meiner Mutter danke ich herzlich für ihren Rat und ihrer Motivation während der gesamten Studienzeit. Meinen verstorbenen Vater danke ich für seine Kraft und seinen Zuspruch. Ohne Euch wäre dies nicht möglich gewesen.

Meiner Frau danke ich herzlich für ihre Kraft, Energie und ihr Durchhaltevermögen während der gesamten Zeit dieser Arbeit.

10 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar eine Vergütung oder geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben in Bezug auf die Zulassung der klinischen Studien, die Bestimmungen des Tierschutzgesetzes, die Bestimmungen des Gentechnikgesetzes und die allgemeinen Datenschutzbestimmungen wurden eingehalten. Ich versichere, dass ich die Regelungen der Satzung der Universität Leipzig zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis kenne und eingehalten habe.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift

11 Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Florian Kaatz
Adresse	Stieglitzstraße 90, 04229 Leipzig
Geburtsdatum / Geburtsort:	07.11.1987 / Weimar
Kontakt	Telefon: 01604427711, Email: Florian01@gmx.de

Schulischer und akademischer Werdegang

11/2017	Approbation als Zahnarzt
01/2013 – 11/2017	Stipendiat der Stiftung Begabtenförderung berufliche Bildung (SBB)
10/2012 – 11/2017	Studium der Zahnmedizin an der Universität Leipzig
09/2008 – 06/2011	Allgemeine Hochschulreife Heinrich-Mann-Gymnasium Erfurt
09/2004 – 09/2007	Berufsausbildung Gesundheits- und Krankenpfleger Berufsbildende Schule für Gesundheit und Soziales Weimar
1998 – 2004	Realschulabschluss Klosterbergschule Bad Berka

Beruflicher Werdegang

06/2018 – heute	Weiterbildungsassistent für Oralchirurgie in der Kieferchirurgischen Gemeinschaftspraxis Dr. Neubauer, Dr. Schreder, Dr. Heinrich
01/2018 – 05/2018	Vorbereitungsassistent Dr. med. dent. Jens Voss
09/2007 – 08/2011	Gesundheits- und Krankenpfleger der Zentralklinik Bad Berka GmbH

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift

12 Anhang

Publikationen:

- Posterpräsentation „Die unterschiedlichen Arten der Darstellung der Arteria thoracica interna (ITA) und ihrer Abgänge“ im Rahmen des 14. Research-Festivals der Universität Leipzig, Leipzig 2018, ISBN: 978-3-00-058756-6
- Veröffentlichung des Fachartikels „Anatomic study of the vascular perfusion of the sternum and its clinical relevance in deep sternal wound infection“ in GMS Interdisciplinary plastic and reconstructive surgery DGPW 2017, Vol. 6, ISSN 2193-8091 (Deckblatt)

Die unterschiedlichen Arten der Darstellung der Arteria thoracica interna (ITA) und ihrer Abgänge

* **Kaatz F.**¹, Feja C.¹, Hammer N.¹, Spindler N.², Löffler S.¹

¹ Institut für Anatomie, Universität Leipzig, Leipzig, Deutschland
² Klinik für Orthopädie, Unfallchirurgie und Plastische Chirurgie

Anatomie
Leipzig

UNIVERSITÄT LEIPZIG
Medizinische Fakultät



Einführung:

Tiefe sternale Wundheilungsstörungen sind seltene, aber verheerende Komplikationen nach medianer Sternotomie. Die verminderte Durchblutung von Knochen und Weichgewebe, vor allem nach Verwendung der ITA in der kardio-chirurgischen Bypass-Chirurgie, unterstützt die Entwicklung von Knochennekrosen des Sternums, Abszessen und Wundheilungsstörungen, die bis in das Mediastinum hinein reichen. Das Ziel dieser Studie war die makroskopische und radiologische Darstellung der das Sternum versorgenden Gefäße. Dabei wurden verschiedene Methoden zur Darstellung der ITA, wie die makroskopischen Präparation Alkohol- und Thiel-fixierter Präparate, sowie die Injektion synthetischer Polymere, (Microfil®, Arterienmasse nach Thiel) miteinander verglichen. Da die segmentierungsbasierte Rekonstruktion zunehmend Einzug in die Diagnostik hält, wurden CT-Datensätze segmentiert und ausgewertet, um mögliche Kollateralkreisläufe des Sternums darzustellen.

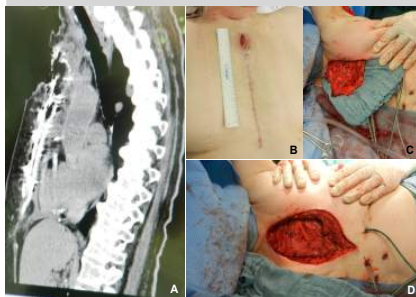


Abb. 1 | klinischer Fall vor und nach operativer Defektversorgung des infizierten Sternums nach kardio- chirurgischer Bypass-Operation



Abb. 3 | Übersicht der makroskopischen Präparation an unterschiedlich fixierten Humanpräparaten. Zur besseren Verständniss werden sie als Thorax-Schild bez.

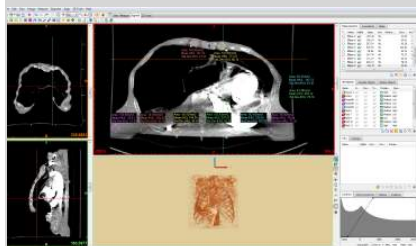
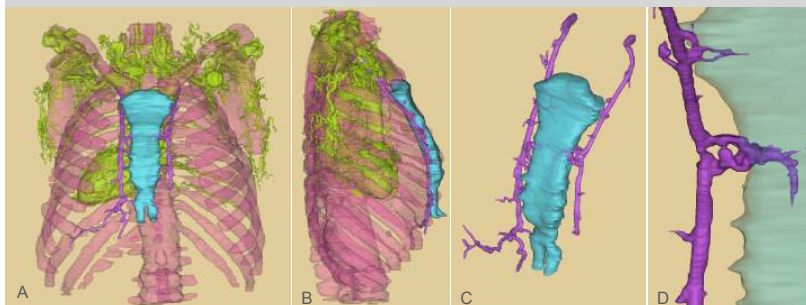


Abb. 4 | Software-Oberfläche des Programms Mimics® - segmentierungs- basierte Rekonstruktion eines Thorax



Schlussfolgerung

Die Verwendung der ITA als Bypass in der Kardiologie senkt die Perfusion des Sternums und begünstigt die Entstehung tiefer sternal Wundheilungsstörungen, wie sie nach medianer Sternotomie auftreten können. Kenntnisse über die makro- und mikrovaskuläre Anatomie der das

Sternum versorgenden Gefäße stellt dabei ein wichtiges Bindeglied zur möglichen Prävention postoperativer sternaler Gewebefekte dar. Besonders Kollateralkreisläufe, die eine Blutversorgung des Sternums nach Entnahme der ITA gewährleisten können, stehen dabei im Vordergrund. Die im Rahmen dieser Studie angewandten Methoden konnten das makroanatomische Gefäßsystem des Sternums darstellen, wobei die

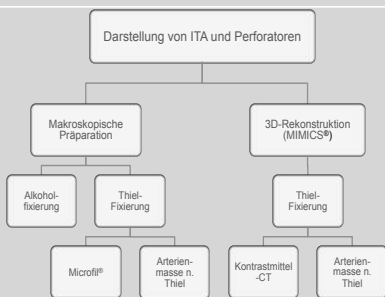


Abb. 2 | Grafische Darstellung der Methodik der vorliegenden Arbeit

Tab. 1 | Untersuchungsmethode je Körpersender unter Aufteilung in Alkohol - und Thiel-Fixierung

Fixierung	Spender-Nr.	Untersuchungsmethode
Alkohol	1	Makroskopische Präparation
	2	Makroskopische Präparation
Thiel	3	Microfil®-Technik Makroskopische Präparation
	4	Arterienmasse Makroskopische Präparation CT/Segmentierung via MIMICS®
	5	CT/Segmentierung via MIMICS®

Tab. 2 | Tabelle zur semi-quantitativen Bewertung der Methoden- am Beispiel der Arterienmasse nach Thiel nach Präparation

Bewertungskriterien	Bewertung					Punktzahl 1-5
	--	-	0	+	++	
Für Thiel-Fixierung mit Arterienmasse Thiels(1992)						
Präparierbarkeit der Gewebe			x			3
Flexibilität der Gewebe				x		5
Farbkontrast der Gewebe zueinander				x		4
Präparierbarkeit der ITA & Abgänge* (gefüllt)				x		5
Flexibilität der ITA & Abgänge*				x		5
Kontrast der ITA & Abgänge* (gefüllt) zum umliegenden Gewebe				x		5
Gesamtpunktzahl						= 26
Note						= 2

Note: 1= ab 90%, 2= ab 75%, 3= ab 60%, 4= ab 45%, 5= unter 45%
Punkte: 1= ab 27, 2= ab 23, 3= ab 18, 4= ab 14, 5= unter 14
*bspw. sternale Abgänge

Abb. 5 | Das 3D-Modell eines Thorax nach Injektion der Arterienmasse nach Thiel (1992). (A) Ansicht von ventral, (B) - von lateral, (C) Fokus-Ansicht des Sternums und der ITA von ventral, (D) vergrößerter Ausschnitt aus C, wobei die Bild-linke ITA gezeigt ist. grün = Herz und abführende Gefäße; rot = knöcherner Thorax; türkis = Sternum; violett = ITA und Abgänge

Injektion der Arterienmasse am Thiel-fixierten Humanpräparat mit anschließender Segmentierung besonders geeignet war. Jedoch konnten auf diese Weise kollaterale Verbindungen nicht identifiziert werden, wonach eine Wiederholung des Versuches angeraten ist.

Kontakt: florian01@gmx.de

Anatomic study of the vascular perfusion of the sternum and its clinical relevance in deep sternal wound infection

Anatomische Untersuchung der sternalen Gefäßversorgung und ihre klinische Relevanz bei tiefen sternalen Wundheilungsstörungen

Abstract

Introduction: Deep sternal wound infections (DSWI) are a rare but devastating complication after median sternotomy. Minor perfusion in bone and soft tissue, especially after recruiting the internal mammary artery for bypass supports the development of wound infection and nonunion of the sternal bone.

The aim of the study was the macroscopic and radiological presentation of the vascular system supplying the sternum, in particular the compensating blood supply routes in the event that the internal mammary artery is no longer available after use as a bypass vessel.

Method: This anatomic study was carried out on the anterior chest wall of 7 specimens. The thorax plates of 7 specimens were analyzed macroscopically after microsurgical preparation. Different anatomic preparations were produced using different contrast or form-giving substances. Radiological analysis and three-dimensional reconstructions were performed to show alternative, collateral sternal vessel perfusion under estimation of the loss of the internal thoracic artery due to a bypass.

Results: The length of the ITA (internal thoracic artery), measured from the beginning of the first rib to the division into the superior epigastric artery and musculophrenic artery, was an average of 16.3 cm. On average, 18.5 branches were delivered from each artery, 10 medially to the sternum supply, and 8 to the intercostal muscle.

Conclusion: Our analysis gives an overview of the macroanatomic vessel system supplying the sternal bone, describing especially a common trunk deriving from the ITA and supplying multiple branches and playing an important role in building a collateral circulation of the sternum.

For better evaluation, in vivo CT analysis with contrast media should be performed in patients prior to the operation and directly after the use of the double ITA to demonstrate the change in perfusion of the sternum. In the future, preconditioning of the sternum by coiling the deriving branches could become an option, although patient selection has to be improved and further analysis of the topic performed.

Keywords: deep sternal wound infection (DSWI), internal thoracic artery (ITA), vascular system of the sternum

Nick Spindler¹
Florian Kaatz²
Christine Feja²
Christian Etz³
Friedrich-Wilhelm
Mohr³
Ingo Bechmann²
Christoph Josten¹
Stefan Langer¹
Sabine Loeffler²

1 Department of Orthopedic Surgery, Traumatology and Plastic Surgery, University Hospital Leipzig, Leipzig, Germany

2 Institute of Anatomy, University of Leipzig, Leipzig, Germany

3 Department of Cardiac Surgery, Leipzig Heart Center, University of Leipzig, Leipzig, Germany

Zusammenfassung

Einleitung: Tiefe sternale Wundheilungsstörungen sind seltene, aber verheerende Komplikationen nach medianer Sternotomie. Die verminderte Durchblutung von Knochen und Weichgewebe, vor allem nach Verwendung der Arteria thoracica interna in der kardio-chirurgischen Bypass-Chirurgie, unterstützt die Entwicklung von Wundinfektion und ein Nicht-Verheilen des sternalen Knochens. Das Ziel dieser Studie war die makroskopische und radiologische Darstellung der das Sternum versorgenden Gefäße, sowie insbesondere des kollateralen Blutkreis-

